



**Tielaitos**

Anu Kiiskilä

# **Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan**

**Tielaitoksen  
selvityksiä**

**4/1997**

Helsinki 1997

**Tuotanto  
Konsultointi**

Tielaitoksen selvityksiä  
4/1997

Anu Kiiskilä

**Siltojen perustusten geoteknisen  
mitoituksen vertailu eurocodien ja  
kansallisten ohjeiden mukaan**

**Tuotanto**  
Konsultointi

Helsinki 1997



ISSN 0788-3722  
ISBN 951-726-315-5  
TIEL 3200452  
Oy Edita Ab  
Helsinki 1997

Julkaisun kustannus ja myynti:  
Tielaitos, hallintopalvelut,  
painotuotemyynti  
Telefax 0204 44 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi

**Tielaitos**  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde 0204 44 150

## Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa vertaillaan siltojen perustusten geoteknistä mitoitusta eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. Vertailussa käytetään eurooppalaisia esistandardeja: Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat sekä Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu. Kansalliset mitoitukset perustuvat tielaitoksen ohjeisiin.

Tutkimuksessa käsiteltäviä perustustyypppejä ovat maanvaraiset ja paaluperustukset. Tutkimuksessa esitellään vertailussa käytettävien ohjejärjestelmien antamat kuormien yhdistelyn periaatteet, materiaaliparametrien mitoitusarvojen laskennan periaatteet sekä maanvaraisten ja paaluperustusten geotekniset suunnitteluperusteet. Ohjejärjestelmien eroja havainnollistavat laskentaesimerkit, joissa perustusten geotekninen mitoitus tehdään eri ohjejärjestelmien ja mitoitusmenetelmien mukaan. Laskentaesimerkit on valittu tielaitoksen kanssa yhteistyössä. Laskentaesimerkkien lähtötiedot on saatu todellisista kohteista.

Ohjejärjestelmien antamaa suhteellista varmuutta verrattuna vaadittuun varmuustasoon kuvataan suureella mitoitusvarmuusluku. Maanvaraisten perustusten kantavuuskaavaan perustuvissa mitoituksissa mitoitusvarmuusluku on perustuksen kantokyvyn ja pohjapaineen suhde. Liukupinta-analyyseissä mitoitusvarmuusluku on ohjejärjestelmän antaman passiivi- ja aktiivimomentin suhde. Paaluperustusten laskennassa mitoitusvarmuusluku saadaan jakamalla paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo mitoituskuormalla.

Kun verrataan eurocode-ohjejärjestelmän mukaista perustusten geoteknistä mitoitusta kansallisten ohjeiden mukaiseen mitoitukseen voidaan todeta, että eurocodien perusteella geotekninen mitoitus on paljon työläämpää. Tarkastettavia mitoitusilanteita on eurocode-ohjejärjestelmän mukaan kolme tapaukset A, B ja C. Jokaiselle mitoitusilanteelle lasketaan kuormien ja materiaaliominaisuuksien mitoitusarvot. Eurocode-ohjejärjestelmä määrittelee tarkasti nämä erilaisille mitoitusilanteille käytettävät mitoitusarvot, mutta usein suunnittelussa käytettävän mitoitusmenetelmän valinta jää suunnittelijan vastuulle. Laskentaesimerkkien perusteella erilaisten mitoitusmenetelmien käytön vaikutus tulosten hajontaan on suuri.

Laskentaesimerkkien perusteella voidaan todeta, että eurocode-ohjejärjestelmän määräävän mitoituksen antaa tapaus C maanvaraiselle perustukselle. Paaluperustukselle määräävän mitoituksen antaa tapaus B. Tielaitoksen ohjeisiin perustuva sallittujen jännitysten menetelmän tai rajatilamenetelmän mukainen mitoitus antaa taloudellisemman mitoituksen kuin eurocode-ohjejärjestelmän mukaiset määräävät mitoitukset.

KIISKILÄ, Anu: Comparison between Eurocode prestandards and Finnish standards in geotechnical design of bridge foundations. Helsinki 1997, Finnish National Road Administration. Report 4/1997, 62 p., 97 app. TIEL 3200452, ISBN 951-726-315-5, ISSN 0788-3722

Key words Eurocode 1, Eurocode 7, geotechnical design

## Abstract

The purpose of this study is to compare Eurocode prestandards and Finnish standards in the geotechnical design of bridge foundations. In this study two Eurocode prestandards are used, Eurocode 1: Basis of design and actions on structures and Eurocode 7: Geotechnical design. The Finnish standards which are used are made by the Finnish National Road Administration.

The study covers shallow and pile foundations. It presents an evaluation of design values of actions and material properties, a combination of actions and a basis of design of shallow and pile foundations according to Eurocode prestandards and Finnish standards. Design examples clarify differences between design standards. Design examples are chosen in co-operation with the Finnish National Road Administration. Design examples are based on actual reality.

In this study the level of safety in geotechnical design is called 'design safety factor'. The design safety factor is bearing capacity divided by soil pressure in the design of shallow foundations based on bearing capacity equations. If the design is based on analysis of slip surfaces, the design safety factor is passive moment of soil divided by active moment of soil. In the design of piles the design safety factor is design value of bearing capacity divided by design value of action.

When geotechnical design is based on Eurocode prestandards, the designer notices that he has to perform more calculations than when designing in the traditional Finnish way, because prestandards require that all structures comply with cases A, B and C. All cases have different design values of actions and material properties. Eurocode prestandards give exact design values for each case, but very seldom exact design methods. As shown by the design examples, it is very important to choose a reliable design method.

According to the design examples, a critical case is C when designing a shallow foundation. Case B is critical for pile foundations. The Finnish total safety factor method is more economical and a much more practical method than the Eurocode's partial safety factor method. The most economical design is given by the Finnish total safety factor method or the Finnish limit state design.



## **Alkusanat**

Tämä siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailua eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan käsittelevä julkaisu on osa tielaitoksen selvitystä, jossa tutkitaan eurocode-ohjejärjestelmän ja kansallisen mitoituskäytännön eroja. Selvitys on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratoriossa. Tutkimus on tehty professori Jorma Hartikaisen johdolla.

Julkaisun on laatinut Anu Kiiskilä. Julkaisu on samalla hänen diplomityönsä.

Tilaaajan puolelta tätä tutkimusta on valvonut Matti Kuusivaara ja Pentti Salo tielaitoksesta. Tutkimuksen ohjaukseen ovat osallistuneet myös professori Eero Slunga Teknillisestä korkeakoulusta, Panu Tolla ja Mikko Smura tielaitoksesta sekä Juha Heinonen ja Jukka Rantala Tampereen teknillisestä korkeakoulusta.

Helsingissä tammikuussa 1997

Geopalvelut ja Siltatekniikka

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	
Merkinnät ja lyhenteet	

1 JOHDANTO	11
2 VERTAILUSSA TARKASTELTAVAT OHJEET	13
2.1 Yleistä	13
2.2 Kansalliset ohjeet	13
2.3 Eurocode-ohjejärjestelmä	14
2.3.1 Eurocode 1, Osa 1 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja	15
2.3.2 Eurocode 1, Osa 3	16
2.3.3 Eurocode 7 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja	16
3 PERUSTUSTEN KUORMIEN JA MATERIAALIPARAMETRIEN MITOITUSARVOT	17
3.1 Mitoituskuorma tielaitoksen ohjeiden mukaan	17
3.1.1 Maanvaraisen perustuksen mitoituskkuorma	17
3.1.2 Paaluperustuksen mitoituskkuorma	18
3.2 Mitoituskuorma Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan	19
3.2.1 Eurocode 1, Osa 1	19
3.2.2 Eurocode 1, Osa 1 kansallinen soveltamisasiakirja	22
3.2.3 Eurocode 1, Osa 3	24
3.3 Maan mitoitusklujuus perustuksen kantokyvyn laskennassa	26
3.3.1 Tielaitoksen ohje	26
3.3.2 Eurocode 7	26
3.3.3 Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja	27
3.4 Paalun geoteknisen kantavuuden mitoituskarvo	27
3.4.1 Tielaitoksen ohje	27
3.4.2 Eurocode 7	28
3.4.3 Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja	29
4 MAANVARAISEN PERUSTUKSEN GEOTEKNINEN MITOITUS	30
4.1 Perustuksen kantokyky	30
4.1.1 Tielaitoksen ohje	30
4.1.2 Eurocode 7 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja	33
4.2 Perustuksen painuminen	35
4.2.1 Tielaitoksen ohje	35
4.2.2 Eurocode 7 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja	37

5	PAALUN GEOTEKNINEN MITOITUS	39
5.1	Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva menetelmä	39
5.2	Kairausvastukseen perustuva menetelmä	41
5.3	Dynaamisiin paalutuskavoihin perustuva menetelmä	41
5.4	Dynaamisiin koekuormituksiin perustuva menetelmä	43
6	GEOTEKNISEN MITOITUKSEN TARKASTELU LASKENTAESI-MERKKIEN POHJALTA	44
6.1	Käytetyt ohjejärjestelmät	44
6.2	Maanvaraiset perustukset	45
6.2.1	Laskentaesimerkki 1	45
6.2.2	Laskentaesimerkki 2	46
6.2.3	Johtopäätökset	47
6.3	Paaluperustukset	47
6.3.1	Laskentaesimerkki 3	48
6.3.2	Laskentaesimerkki 4	50
6.3.3	Laskentaesimerkki 5	51
6.3.4	Laskentaesimerkki 6	52
6.3.5	Laskentaesimerkki 7	54
6.3.6	Johtopäätökset	55
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	56
8	LÄHTEET	59
9	LIITTEET	62
Liite 1.	LASKENTAESIMERKKI 1. Maanvarainen sillan maatuki Kantokykykaavaan perustuva mitoitus	63
Liite 2.	LASKENTAESIMERKKI 2. Penkereen varaan perustaminen Vakavuus- ja kantavuuslaskenta	71
Liite 3.	LASKENTAESIMERKKI 3. Ristonmaan risteysilta Suljetut teräspuikipaalut, tuki G vasen paalu	82
Liite 4.	LASKENTAESIMERKKI 4. Kutujoen silta Kaivin- ja teräspuikipaalu vaihtoehdot, tuki 2 paalu K4	97
Liite 5.	LASKENTAESIMERKKI 5. Mikonkorven risteysilta Sipulipaalu, tuki 1, paalu 1	115
Liite 6.	LASKENTAESIMERKKI 6. Ounasjoen silta Franki-puikipaaluryhmä, tuki 4	128
Liite 7.	LASKENTAESIMERKKI 7. Aurajokilaakson silta Teräsbetonipaalu ryhmä, tuki 1	145

## Merkinnät ja lyhenteet

### Tielaitoksen käyttämät merkinnät

$A$	on paalun poikkileikkausala
$A_{pk}$	on paalun kärjen poikkileikkausala
$B$	on perustuksen lyhyempi sivu
$B_t$	on perustuksen lyhyemmän sivun tehokas leveys
$c$	on paalun jousto
$C_1$	on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmainen muodonmuutos
$C_2$	on paalun kimmainen muodonmuutos
$C_3$	on maan kimmainen muodonmuutos
$c_T$	on kerroin kokoonpuristuvan kerroksen paksuudelle
$d$	on paalun halkaisija
$D$	on perustamissyvyys
$e_f$	on järkäleen tehokkuuskerroin
$e_B$	on kuormien epäkeskeisyys perustuksen leveyden suunnassa
$e_L$	on kuormien epäkeskeisyys perustuksen pituuden suunnassa
$E_d$	on maapohjan muodonmuutosmoduuli
$E_p$	on paalun kimmokerroin
$f_s$	on vaippavastus
$g$	on kantokyvyn pienennyskerroin kaltevalle maanpinnalle
$g_i$	on pysyvän kuorman ominaisarvo
$H$	on järkäleen pudotuskorkeus tai kuormitusresultantin vaaka-komponentti
$i_B$	on kuormitusresultantin kaltevuudesta riippuva kerroin
$i_D$	on kuormitusresultantin kaltevuudesta riippuva kerroin
$i_s$	on perustuksen muotokerroin
$k$	on korjauskerroin
$K_s$	on maanpainekerroin
$L$	on paalun pituus tai perustuksen pidempi sivu
$L_t$	on perustuksen pidemmän sivun tehokas leveys
$m_z$	on moduuliluku syvyydellä $z$
$n$	on joustokerroin
$N_B$	on kantavuuskerroin
$N_D$	on kantavuuskerroin
$N_q$	on kantavuuskerroin
$P_u$	on paalun murtokuorma
$q$	on pohjapaine
$q_d$	on mitoituskuorma
$q_{k1}$	on pystysuoran liikennekuorman ominaisarvo
$q_{k2}$	on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$q_{ki}$	on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo
$q_p$	on kärkivastus
$s$	on painuma
$s_B$	on perustuksen muodosta riippuva kerroin
$s_D$	on perustuksen muodosta riippuva kerroin
$V$	on resultantin pystykomponentti



$w$	on järkäleen paino
$w_p$	on paalun paino
$\beta$	on luiskan kaltevuus vaakatason suhteen
$\gamma$	on maan tilavuuspaino pohjaveden yläpuolella
$\gamma'$	on maan tehokas tilavuuspaino pohjavedenpinnan alapuolella
$\gamma_1'$	on maan tehokas tilavuuspaino perustamistason yläpuolella
$\gamma_2'$	on maan tehokas tilavuuspaino perustamistason alapuolella
$\gamma_\phi$	on kitkakulman tangentin osavarmuusluku
$\varepsilon_z$	on maakerroksen suhteellinen kokoonpuristuma
$\sigma_{cz}$	on tehokas esikuormituksesta aiheutuva pystysuora normaali-jännitys syvyydellä $z$
$\sigma_{of}$	on maapohjan kantokyky
$\sigma_v'$	on tehokas pystysuora jännitys maassa
$\sigma_{vp}'$	on tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla
$\sigma_z$	on perustuksen ja maan oman painon aiheuttama tehokas pystysuora normaalijännitys syvyydellä $z$
$\phi$	on kitkakulman ominaisarvo
$\phi_a$	on paalun ja maan välinen kitkakulma
$\phi_n$	on kitkakulman mitoitusarvo

### Eurocodien käyttämät merkinnät

$A'$	on perustuksen tehokas pinta-ala
$B'$	on perustuksen tehokas leveys
$c'$	on tehokas koheesio
$c_u$	on suljettu leikkauslujuus
$E_d$	on mitoituskuorma
$E_m$	on maakerroksen mitoituskimmomoduuli
$f$	on kerroin, jota käytetään perustuksen painuman laskennassa
$G_{kj}$	on pysyvän kuorman ominaisarvo
$H$	on kuorman vaakaresultantti
$i_c$	on kuormituksen kaltevuudesta riippuva kerroin
$i_q$	on kuormituksen kaltevuudesta riippuva kerroin
$i_\gamma$	on kuormituksen kaltevuudesta riippuva kerroin
$L'$	on perustuksen tehokas pituus
$N_c$	on kantavuuskerroin
$N_q$	on kantavuuskerroin
$N_\gamma$	on kantavuuskerroin
$p$	on perustuksen pohjapaine
$q'$	on tehokas mitoituspaine perustuksen pohjan tasolla
$q_u$	on maan tai kallion puristuslujuus
$Q_{k1}$	on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$Q_{ki}$	on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo
$R$	on pystysuorien voimien resultantti
$s$	on painuma
$s_c$	on perustuksen muotokerroin



$s_q$	on perustuksen muotokerroin
$s_\gamma$	on perustuksen muotokerroin
$V$	on kuorman pystyresultantti
$\gamma'$	on tehokas tilavuuspaino perustustamistason alapuolella
$\gamma_{Gj}$	on pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Q1}$	on määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Qi}$	on muuttuvan kuorman i osavarmuusluku
$\delta$	on pohjan kitkakulman mitoitusarvo
$\xi$	on kerroin, jota käytetään johdettaessa paalun kantokyvyn ominaisarvoa
$\phi$	on kitkakulman ominaisarvo
$\phi'$	on kitkakulman mitoitusarvo
$\psi_{0i}$	on muuttuvan kuorman i yhdistelmäarvon kerroin
$\psi_{2i}$	on muuttuvan kuorman i pitkäaikaisen arvon kerroin

### Käytetyt lyhenteet ja merkinnät

$F_d$  on mitoitusvarmuusluku

Kunkin perustuksen laskentaesimerkissä ohjejärjestelmän antamaa suhteellista varmuutta verrattuna vaadittuun varmuustasoon kuvataan suureella mitoitusvarmuusluku, joka on yksi, kun perustuksen geoteknisellä mitoituksella on vaadittu varmuustaso.

Mitoitusvarmuusluku on maanvaraisen perustuksen kantokykykaavaan perustuvassa mitoituksessa perustuksen kantokyvyn mitoitusarvon ja perustuksen pohjapaineen mitoitusarvon suhde. Liukupinta-analyyseissä mitoitusvarmuusluku on passiivi- ja aktiivimomenttien mitoitusarvojen suhde. Paaluihin liittyvissä laskentaesimerkeissä mitoitusvarmuusluku on paalun kantavuuden mitoitusarvon ja mitoituskuorman suhde.

## 1 JOHDANTO /2, 3, 4, 11, 18, 19/

Ennen toista maailmansotaa geoteknisiä suunnitteluohjeita oli julkaistu hyvin vähän. Sodan jälkeen kiinnostuttiin geoteknisten laskentamenetelmien kehittämisestä ja rakenteiden suunnitteluohjeissa alettiin kiinnittää huomiota rakenteiden varmuuteen. Brinch Hansen käytti termiä rajatilamenetelmä ensimmäisen kerran vuonna 1956 geoteknisen suunnittelun yhteydessä. Vuonna 1965 laadittiin ensimmäiset rajatilamenetelmään perustuvat tanskalaiset pohjarakennusnormit. Tanskalaiset normit on uudistettu vuosina 1977 ja 1984. Uudistamistyössä oli voimakkaasti mukana Niels Krebs Ovesen.

Suomessa julkaistiin ensimmäiset pohjarakennusnormit vuonna 1964. Tätä ennen suunnittelu perustui eri maiden normeihin, jotka pääasiassa olivat ruotsalaisperäisiä.

Pohjoismaisen yhteistyön tuloksena syntyi vuonna 1978 raportti, NKB report No 36, joka käsitteli rakenteiden kuormia ja varmuutta. Raportissa määritettiin rajatilamitoituksen periaate. Sen mukaan mitoitus tehtiin murto- ja käyttörajatilassa. Raportti antoi kuormien yhdistelyn periaatteet ja osavarmuusluvut. Raportin mukaan osavarmuusluvut riippuivat rakenteen vaurioluokasta, lujuusparametrien hajonnasta sekä määrityksen epätarkkuudesta, murtumistyyppistä ja laskumenetelmän kelvollisuudesta.

Raportti vaikutti pohjoismaisten suunnittelunormien kehitykseen. Tosin usein raportin antamia varmuusperusteita yksinkertaistettiin. Norjassa otettiin käyttöön osavarmuusluvut, jotka ottivat huomioon vaurion suuruuden ja murtumistyyppin. Suomalaisissa normeissa ja ohjeissa osavarmuusluvut valitaan laskentamenetelmän kelvollisuuden ja työn suorituksen perusteella.

Vuonna 1979 julkaistiin Pohjarakennusohjeet RIL 121. Julkaisu korvasi vuonna 1964 julkaistut pohjarakennusnormit. Pohjarakennusohjeet perustuvat rakentamismääräyskokoelman osan B3 pohjarakennusta koskeviin määräyksiin. Tällä hetkellä pohjarakenteiden suunnittelu perustuu vuonna 1988 julkaistuihin ohjeeseen Pohjarakennusohjeet 1988. Julkaisu on laadittu siten, että pohjarakenteiden geotekninen mitoitus voidaan tehdä rajatilamenetelmällä osavarmuuslukuja käyttäen. Ohjeessa käytetään rajatilatarkastelujen käsitteitä, mutta mahdollistetaan silti geotekninen mitoitus kokonaisvarmuutta tai sallittuja jännityksiä käyttäen. Julkaisun antamat mitoitusperusteet ovat hyvin lähellä norjalaista ja ruotsalaista mitoituskäytäntöä.

Nykyään rajatilamitoituksen periaate on laajasti esillä pohjarakenteiden suunnittelussa, ainakin normien ja ohjeiden tasolla. Todellisuudessa muut rakenteet suunnitellaan rajatilamenetelmällä, mutta usein pohjarakenteiden mitoitus perustuu yhä sallittujen jännitysten menetelmään.

Eurocodien eli eurooppalaisten kantavien rakenteiden suunnitteluohjeiden mitoitus perustuu rajatilamenetelmään ja osavarmuuslukuihin. Standardin

Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu laatimistyö aloitettiin vuonna 1990. Alakomitean SC7 puheenjohtajana toimii tanskalainen Niels Krebs Ovesen.

Eurocodien laatimistyö on vielä kesken, mutta tärkeimmät ohjejärjestelmän osat ovat esistandardivaiheessa. Esistandardeja voidaan käyttää tavanomaisten rakenteiden suunnittelussa. Esistandardien kanssa käytetään kansallisia soveltamisasiakirjoja, joissa on huomioitu kyseisen maan erityisvaatimukset sekä ohjejärjestelmän keskeneräisyys. Koekäyttöajan kuluttua esistandardit on tarkoitus muuttaa standardeiksi, jotka korvannevat vastaavat kansalliset määräykset ja ohjeet.

Keväällä 1996 tielaitoksen geo- ja siltakeskus käynnistivät selvityksen, jossa tutkitaan eurocode-ohjejärjestelmän vaikutusta siltöjen perustusten geotekniseen mitoitukseen. Tutkimus toteutettiin diplomityönä. Samaan aikaan käynnistettiin toinen selvitys, jossa tutkitaan tiepenkereiden, luonnonluiskien ja tukimuurien mitoitusta eurocode-ohjejärjestelmän mukaan. Se toteutettiin myös diplomityönä.

Tämän julkaisun tavoitteena on vertailla geoteknistä mitoitusta eurocode-ohjejärjestelmän ja kansallisten suunnitteluohjeiden mukaan. Tutkimuksessa käsiteltäviä perustustyyppöjä ovat maanvaraiset ja paaluperustukset. Julkaisussa esitellään vertailussa käytettävät ohjejärjestelmät, eri ohjejärjestelmien mukaiset kuormien yhdistelyn periaatteet sekä maanvaraisten ja paaluperustusten geoteknisen mitoituksen periaatteet. Ohjejärjestelmien eroja havainnollistavat laskentaesimerkit, joissa perustusten geotekninen mitoitusta tehdään eri ohjejärjestelmien ja mitoitusten menetelmien mukaan. Laskentaesimerkit ovat julkaisun liitteinä.



## 2 VERTAILUSSA TARKASTELTAVAT OHJEET

### 2.1 YLEISTÄ

Julkaisussa vertaillaan siltojen perustusten geoteknistä mitoitusta eurocode-esistandardien ja kansallisten ohjeiden mukaan. Kansallisten ohjeiden mukainen suunnittelu tehdään pääasiassa tielaitoksen ohjeiden mukaan. Tielaitoksen geoteknistä suunnittelua koskevissa ohjeissa on viittauksia mm. julkaisuihin Lyöntipaalutusohjeet LPO-87 ja Suurpaalutusohje RIL 212-1995. Eurooppalaisen standardisoimisjärjestön CEN:n esistandardeista vertailussa käytetään eurocodeja eli eurooppalaisia kantavien rakenteiden suunnitteluohjeita. Geotekniseen suunnitteluun liittyviä esistandardeja ovat ENV 1991 Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat sekä ENV 1997 Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu. Ohjeiden vertailussa käytetään myös esistandardeihin liittyviä kansallisia soveltamisasiakirjoja (NAD).

### 2.2 KANSALLISET OHJEET /19, 23, 24, 25/

Suomessa käytetään yleisten teiden siltojen suunnittelussa tielaitoksen ohjeita. Kansallisten ohjeiden mukainen siltojen maanvaraisten perustusten geotekninen mitoitus tehdään tielaitoksen ohjeiden Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa TIEL 2172068 ja Siltojen kuormat TIEL 2172072 mukaan. Paaluperustusten geoteknisessä mitoituksessa edellä mainittujen ohjeiden lisäksi käytetään tielaitoksen julkaisua Teräsputkipaalut TIEL 2173448 sekä julkaisuja Lyöntipaalutusohjeet LPO-87 ja Suurpaalutusohje RIL 212-1995.

Tielaitoksen ohje Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa käsittelee siltaperustusten geoteknistä suunnittelua. Ohje täydentää siltaperustusten osalta Suomen Rakennusinsinööri Liitto ry:n julkaisua Pohjarakennusohjeet RIL 121-1988. Julkaisussa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa esitetään hyväksytyjä laskentamenetelmiä, joita voidaan käyttää siltojen pohjarakenteiden suunnittelussa. Pohjarakenteiden mitoitus perustuu tavallisesti sallittujen jännitysten menetelmään. Paaluperustusten geoteknisen suunnittelun osalta on ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa Luku 10 Perustaminen paaluille tarkistettu vuonna 1996. Tarkistetun Luvun 10 mukaan paalujen geotekninen mitoitus voidaan tehdä sallittujen jännitysten menetelmällä tai rajatilamenetelmällä.

Tielaitoksen julkaisussa Siltojen kuormat esitetään yleisten teiden siltojen suunnittelussa käytettävät ominaiskuormat ja niiden käyttöä koskevat varmuusperusteet eri mitoitusmenetelmien yhteydessä. Ohje perustuu Pohjoismaisen Tieteknillisen Liiton raporttiin 4:1980 Lastbestemmelser for vegbroer ja ympäristöministeriön julkaisemaan Suomen rakentamismääräyskokoelman määräykseen B1 Rakenteiden varmuus ja kuormitukset. Ohjeessa määritetään siltoihin kohdistuvien pysyvien ja muuttuvien kuormien ominaisarvot ja kuormien yhdistelyn periaate sallittujen jännitysten menetelmän sekä rajatilamenetelmän mukaisissa mitoituksissa ja kuormien osavarmuusluvut rajatilamitoituksen yhteydessä.

### 2.3 EUROCODE-OHJEJÄRJESTELMÄ /9, 10, 15, 22/

Eurocode-ohjelma käynnistettiin jo 1970-luvulla Euroopan Talousyhteisössä. Eurocodet ovat osa standardien harmonisointityötä, jolla pyritään poistamaan kaupan tekniset esteet rakennusosalta. Vuonna 1990 Euroopan yhteisön komissio siirsi vastuun kantavien rakenteiden suunnitteluohjeiden eli eurocodien jatkokehityksestä, julkaisemisesta ja päivityksestä Eurooppalaiselle standardisomisjärjestölle (CEN). Standardisomisjärjestön tekninen komitea CEN/TC 250 Structural Eurocodes vastaa eurocode-työstä. EU:lle jäi työn osittainen rahoitus ja valvonta. EU antaa eurocode-standardien laatimiseen mandaatit eli toimeksiannot, jotka ovat edellytyksenä EU:sta saatavalle rahoitukselle.

Suomessa Suomen standardisomisliitto (SFS) on jakanut vastuun CEN:in teknisistä komiteoista rakennusalan toimialayhteisöilleen. Niiden tehtävänä on edustaa Suomen standardisomisliittoa oman alansa teknisten komiteoiden työssä. Tielaitos vastaa mm. teknisen alakomitean TC 250/SC7 työstä, jonka tehtävänä on valmistella geotekniikan alan suunnittelustandardeja.

Eurocode-työ on aihepiiriltään erittäin laaja. Se käsittää kantavien rakenteiden suunnittelussa tarvittavan perusaineiston: suunnitteluperusteet, kuormat ja erilaisten materiaalien suunnitteluohjeet. Lopullinen ohjejärjestelmä muodostuu yhdeksästä eurocode-standardista. Jokainen standardi muodostuu useasta osasta.

Eurocode-standardien odotetaan täyttävän useita vaatimuksia. Standardien teknisen sisällön on oltava ajan tasalla ja perustuttava parhaaseen nykytietämykseen. Standardien mukaisen suunnittelun tulee johtaa taloudellisiin rakenteisiin ja standardien sisällön tulee olla kattava. Standardien tulee olla keskenään yhteensopivia ja niiden tulee sopia ATK-pohjaiseen suunnitteluun. Lisäksi standardit on laadittava siten, että ne ovat käyttökelpoisia jokapäiväisessä suunnittelutyössä.

Ennen kuin esistandardi vahvistetaan standardiksi, esistandardia koekäytetään kolme vuotta. Tarvittaessa koekäyttöaikaa voidaan jatkaa kahden vuoden jatkoajalla. Koekäyttöjakson loppupuolella kansalliset kommentit lähetetään CEN:lle ja sen jälkeen alkaa viimeistely lopulliseksi standardiksi. Standardin käyttöönottoon on varattu viiden vuoden siirtymäaika. Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu standardin laatiminen on käynnistetty. Eurocodien standarditunnukset ovat EN 1991 - EN 1999. Vastaavat esistandarditunnukset ovat ENV 1991 - ENV 1999. Esistandardeiksi CEN:n keskussihteeristö on vahvistanut kaikkiaan 24 eurocode-osaa 30.6.1995 /9, s. 13/. Lopulliseen ohjejärjestelmään kuuluu kaikkiaan 56 osaa.

Esistandardivaiheessa olevaa eurocodea käytettäessä tarvitaan itse esistandardin lisäksi kansallinen soveltamisasiakirja. Kansallisesta soveltamisasiakirjasta käytetään lyhennettä NAD (=National Application Document). Eurocode-ohjejärjestelmään liittyvät kansalliset soveltamisasiakirjat annetaan kussakin maassa erikseen ja ovat voimassa suunniteltujen rakenteiden sijainti-



maassa. Ne ottavat huomioon kyseisen maan voimassaolevat normit ja määräykset sekä standardijärjestelmän keskeneräisyyden.

Jokainen esistandardi jakaantuu päätekstiin ja liitteisiin. Päätekstissä esitetään periaate- ja soveltamissäännöt. Periaatesäännöt on merkitty P-kirjaimella. Periaatesäännöt käsittävät yleismääräykset ja määritelmät sekä vaatimukset ja käytettävät analyttiset mallit, joille ei sallita vaihtoehtoa. Soveltamissäännöt ovat yleisesti tunnettuja sääntöjä, jotka noudattavat periaatesääntöjä ja toteuttavat niiden vaatimukset. Soveltamissääntöjen sijasta voidaan käyttää vaihtoehtoisia sääntöjä, jotka ovat periaatesääntöjen mukaisia. Liitteet ovat informatiivisia tai standardina noudatettavia.

Suomessa osa esistandardeista on koekäyttövaiheessa. Eurocode-esistandardeja voidaan käyttää yhdessä kansallisten soveltamisasiakirjojen kanssa suunnittelussa vaihtoehtona rakentamismääräyskokoelman määräyksille ja ohjeille. Eurocode-esistandardien mukainen kantavien rakenteiden suunnittelu tuli mahdolliseksi 1.10.1995 alkaen, kun kuormituksia käsittelevän Eurocode 1-esistandardin tärkeimpiä osia koskeva kansallinen soveltamisasiakirja tuli voimaan. Tulevaisuudessa eurocode-standardit korvaavat kansalliset viranomaismääräykset ja ohjeet. Jo koekäyttöaikana rakennesuunnittelijoiden ja viranomaisten pitäisi tutustua eurocodien mukaiseen suunnitteluun, jotta laajat käyttökokemukset auttaisivat eurocodien viimeistelyä käyttökelpoisiksi ja laadukkaiksi ohjeiksi.

Tässä tutkimuksessa käytetään seuraavia esistandardeja ja kansallisia soveltamisasiakirjoja:

- ENV 1991-1:1994 Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 1: Basis of design,
- SFS-ENV 1991-1 Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Osa 1: Suunnitteluperusteet,
- Kansallinen soveltamisasiakirja esistandardille SFS-ENV 1991-1
- ENV 1991-3:1995 Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 3: Traffic loads on bridges,
- ENV 1997-1:1994 Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules,
- SFS-ENV 1997-1 Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu, Osa 1: Yleiset säännöt ja
- Kansallinen soveltamisasiakirja esistandardille SFS-ENV 1997-1.

Kansallinen soveltamisasiakirja puuttuu esistandardilta ENV 1991-3.

### **2.3.1 Eurocode 1, Osa 1 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja /5, 15, 27/**

Eurocode 1, Osa 1 määrittelee suunnittelulle asetetut vaatimukset ja käytettävät symbolit. Asiakirjassa esitetään kuormien jaottelun ja rajatilamitoituksen periaate. Käytettäviä rajatilamitoituksia ovat murto- ja käyttörajatilamitoitus. Asiakirjassa esitetään kuormien yhdistelyn periaate yleisesti ja muuttuvien

kuormien yhdistelmäarvon kertoimet rakennuksille. Asiakirjassa annetaan myös pysyville ja muuttuville kuormille käytettävät osavarmuusluvut.

Eurocode 1 muissa osissa määritetään ominaiskuormien arvot, mm. käytettävät rakenteiden tiheydet, omat painot sekä hyötykuormat. Tämän julkaisun laskentaesimerkeissä kuormien ominaisarvot oletetaan samoiksi kaikille ohjejärjestelmille. Eri ohjejärjestelmien mukaiset mitoituskuormat lasketaan pysyvien ja muuttuvien kuormien ominaisarvoista käyttäen jokaisen ohjejärjestelmän mukaista kuormien yhdistelyn periaatetta.

Eurocode 1 kansallisessa soveltamisasiakirjassa annetaan muutamia lisäyksiä ja muutoksia esistandardiin. Muutokset koskevat kuormien osavarmuuskerroimia ja muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimia.

### 2.3.2 Eurocode 1, Osa 3 /6/

Eurocode 1, Osa 3 määrittelee siltöjen liikennekuormien ominaisarvojen laskentaperusteet. Esistandardissa annetaan siltöjen osalta kuormien yhdistelyperiaatteisiin joitakin muutoksia ja lisäyksiä Eurocode 1, Osan 1 antamiin ohjeisiin. Esistandardissa annetaan siltakuormille muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet ja kuormien osavarmuusluvut.

Liitteinä olevien laskentaesimerkkien liikennekuormien ominaisarvoja ei laskea tämän esistandardin mukaan, vaan ominaiskuormina käytetään tielaitoksen ohjeen Siltöjen kuormat mukaisia ominaiskuorman arvoja, koska tutkimus päätettiin rajata geoteknisen mitoituksen vertailuun. Hyvä lisätutkimusaihe voisi olla eurocode-ohjejärjestelmän ja kansallisten ohjeiden antamat rakenteiden ominaiskuormat. Laskentaesimerkkien mitoitusapauksien Euro 1-3 B ja C ominaiskuormat yhdistetään tämän ohjeen mukaan.

### 2.3.3 Eurocode 7 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja /7, 16, 28/

Eurocode 7 antaa geotekniseen suunnitteluun liittyvät ohjeet. Asiakirjan alussa määritetään geoteknisen suunnittelun perusteet. Esistandardin toisessa luvussa määritetään käytettävät materiaalien osavarmuusluvut. Esistandardin luvussa 6 annetaan ohjeet antura- ja laattaperustusten suunnitteluun. Esistandardin luku 7 käsittelee paaluperustuksia. Perustusten kantokyvyn ja painumien laskentaa on käsitelty esistandardin informatiivisissa liitteissä B, C ja D.

Eurocode 7 kansallisessa soveltamisasiakirjassa annetaan joitakin muutoksia käytettäville materiaalien osavarmuusluvulle.



### 3 PERUSTUKSEN KUORMIEN JA MATERIAALIPARAMETRIEN MITOITUSARVOT

Perustuksen geoteknisen mitoituksen lähtökohtana on selvittää kuormat, jotka perustukseen kohdistuvat. Toisaalta tulee arvioida materiaalin lujuus. Siltojen perustusten geoteknisessä mitoituksessa käytettävät mitoituskuormat ja materiaaliparametrien mitoitusarvot riippuvat mitoitusmenetelmästä sekä käytettävästä ohjejärjestelmästä. Tutkimuksessa käsitellään siltojen perustusten geoteknisen kantavuuden laskentaa, joten geoteknisessä mitoituksessa käytettävät kuormien yhdistelyperiaatteet ja materiaalien osavarmuusluvut esitetään ohjejärjestelmittäin.

Laskentaesimerkeissä lasketaan vain maanvaraisen perustuksen kantokyky, ei perustuksen painumaa. Tässä luvussa esitetään kuitenkin perustuksen painuman laskennassa käytettävät mitoituskuormat ja materiaaliparametrien mitoitusarvot ohjejärjestelmittäin.

Eri ohjejärjestelmien mukaan mitoituskuorma saadaan kertomalla perustukseen kohdistuvat ominaiskuormat eri ohjejärjestelmien mukaisilla osavarmuusluvuilla ja mahdollisilla kuormien yhteisvaikutusta arvioivilla kertoimilla. Nämä kertoimet saattavat saada vakioarvon tai muuttua kuormatyypin mukaan.

Maanvaraisen perustuksen geoteknisen kantavuuden laskennassa tarvittava maan mitoituslujuus saadaan jakamalla maan lujuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla. Paalujen geoteknistä kantavuutta laskettaessa rajatilamenetelmällä paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo saadaan käyttämällä mitoitusmenetelmään ja ohjejärjestelmään liittyviä varmuuslukuja. Sallittujen jännitysten menetelmällä geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun murto-kuorma kokonaisvarmuusluvulla.

#### 3.1 MITOITUSKUORMA TIELAITOKSEN OHJEIDEN MUKAAN

Tielaitoksen julkaisussa Siltojen kuormat määritetään yleisten teiden siltojen suunnittelussa käytettävät ominaiskuormat. Pohjarakenteiden geoteknisessä mitoituksessa käytettävät kuormien yhdistelyperiaatteet ja materiaalien osavarmuusluvut on annettu tielaitoksen julkaisussa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa.

##### 3.1.1 Maanvaraisen perustuksen mitoituskuorma /23/

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan maanvaraisen perustuksen kantokykyä laskettaessa kuormina käytetään ominaiskuormia, joiden laskentaperusteet on esitetty ohjeessa Siltojen kuormat. Kuormayhdistelmissä pysyvät kuormat, pystysuora liikennekuorma ja yksi määräävä muuttuva kuorma vaikuttavat täydellä ominaiskuorman arvolla. Muut muuttuvat kuormat vaikuttavat puolella ominaiskuorman arvolla. Maan-



varaisen perustuksen kantokykyä laskettaessa mitoituskuorma  $q_d$  määritetään kaavasta (3.1).

$$q_d = \sum_{i=1}^m g_i + q_{k1} + q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5 q_{ki}, \quad (3.1)$$

missä

- $g_i$  on pysyvän kuorman  $i$  ominaisarvo,
- $q_{k1}$  on pystysuoran liikennekuorman ominaisarvo:
  - kaaviot 1, 2, 3 tai
  - raskas erikoiskuorma tai
  - kuorma tienpenkereellä tai
  - kevyen liikenteen sillan liikennekuorma,
- $q_{k2}$  on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
  - muuttuva kuorma yleensä tai
  - jääkuorma ja
- $q_{ki}$  on muun muuttuvan kuorma  $i$  ominaisarvo.

Kun lasketaan maanvaraisen perustuksen painumaa, perustuksen mitoituskuorma saadaan pysyvien kuormien ja pystysuorien liikennekuormien ominaisarvojen summasta. Painumaa laskettaessa mitoituskuorma  $q_d$  saadaan kaavasta (3.2).

$$q_d = \sum_{i=1}^m g_i + q_{k1}, \quad (3.2)$$

missä

- $g_i$  on pysyvän kuorman  $i$  ominaisarvo ja
- $q_{k1}$  on pystysuoran liikennekuorman ominaisarvo,
  - kaaviot 1, 2, 3 tai
  - raskas erikoiskuorma tai
  - kuorma tienpenkereellä tai
  - kevyen liikenteen sillan liikennekuorma.

### 3.1.2 Paaluperustuksen mitoituskuorma /23, 24/

Tielaitoksen julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa luvun 10 tarkistuksen mukaan paaluperustuksen geoteknisen kantavuuden laskenta voidaan tehdä sallittujen jännitysten menetelmällä tai rajatilamenetelmällä.

Sallittujen jännitysten menetelmän mitoituskuorma saadaan kaavan (3.1) mukaan. Kun mitoituksessa käytetään rajatilamenetelmää, otetaan kuormayhdistelmään pysyvä kuorma ominaiskuorman suuruisena, vaikutukseltaan määräävä muuttuva kuorma 1,3-kertaisena ja muut muuttuvat kuormat 0,8-kertaisina. Paalun kantavuuden laskennassa rajatilamenetelmällä mitoituskuorma saadaan kaavasta (3.3).

$$q_d = \sum_{i=1}^m g_i + 1,3 q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,8 q_{ki}, \quad (3.3)$$

missä

- $g_i$  on pysyvän kuorman  $i$  ominaisarvo,
- $q_{k2}$  on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo ja
- $q_{ki}$  on muun muuttuvan kuorman  $i$  ominaisarvo.

### 3.2 MITOITUSKUORMA EUROCODE-OHJEJÄRJESTELMÄN MUKAAN

Esistandardissa Eurocode 1, Osa 1: Suunnitteluperusteet esitetään kaavat, joiden perusteella mitoituskuorma voidaan laskea murto- ja käyttörajatiloissa. Murto- ja käyttörajatiloissa kuormien yhdistelyperiaate ja käytettävät osavarmuusluvut riippuvat mitoituslanteesta ja rakenteesta. Murtorajatilassa mitoitustilanteita on kolme - pitkäaikainen ja tilapäinen tilanne, onnettomuustilanne sekä maanjäristystilanne. Käyttörajatilassa mitoitustilanteita on myös kolme - pysyvä, palautuva ja pitkäaikainen tilanne.

#### 3.2.1 Eurocode 1, Osa 1 /5, 7, 15, 16/

Perustuksen kantokykyä tai paalun kantavuutta määritettäessä mitoituskuorma lasketaan pitkäaikaisille kuormille murtorajatilassa. Eurocode 1, Osan 1 murtorajatilamitoituksen mukainen pitkäaikaisten kuormien yhdistelyperiaate on, että pysyvät kuormat, esijännityskuorma ja yksi määräävä muuttuva kuorma kerrotaan osavarmuusluvuilla. Muut muuttuvat kuormat kerrotaan osavarmuusluvulla ja muuttuvan kuorman yhdistelmäarvon kertoimella. Murtorajatilamitoituksen pitkäaikaisten kuormien mitoituskuorma  $E_d$  saadaan kaavan (3.4) mukaan. Kaavasta (3.4) on jätetty pois esijännityskuorman osuus.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki} \quad (3.4)$$

missä

- $G_{kj}$  on pysyvän kuorman  $j$  ominaisarvo,
- $Q_{k1}$  on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo,
- $Q_{ki}$  on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo,
- $\gamma_{Gj}$  on pysyvän kuorman  $j$  osavarmuusluku,
- $\gamma_{Q1}$  on määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku,
- $\gamma_{Qi}$  on muuttuvan kuorman  $i$  osavarmuusluku ja
- $\psi_{0i}$  on muuttuvan kuorman  $i$  yhdistelmäarvon kerroin.

Eurocode 1, Osassa 1 annetaan osavarmuusluvut ja kuormien yhdistelmäarvon kertoimet rakennuksille. Kuormien osavarmuusluvut rakennusten murtorajatilamitoitukseen on annettu Eurocode 1, Osan 1 taulukossa 9.2.

Osavarmuusluvut riippuvat mitoitus tapauksesta. Mitoitus tapauksia on kolme - tapaus A, B ja C. Tapauksen A osavarmuuslukuja käytetään, kun tarkastellaan rakenteen staattisen tasapainon menetystä. Rakenteen kestävyuden ollessa kyseessä käytetään tapauksen B osavarmuuslukuja. Tapauksen C osavarmuuslukuja käytetään, kun tarkastellaan maapohjan murtumista. Varsinainen rakenteen mitoitus pitää tarkistaa jokaiselle tapaukselle, ellei mitoittava tapaus ole itsestään selvä. Perustuksen kantokyvyn ja paalun kantavuuden määrittämisessä lasketaan tapauksien B ja C mukaiset mitoitus, koska Eurocode 7 mukaan tapaus A tulee kyseeseen ainoastaan nosteongelmissa. Tapauksien A, B ja C mukaiset osavarmuusluvut pitkäaikaiselle ja tilapäiselle tilanteelle on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Kuormien osavarmuusluvut pitkäaikaiselle ja tilapäiselle tilanteelle Eurocode 1, Osan 1 mukaan.

Kuorma	Tapaus A	Tapaus B	Tapaus C
Pysyvä kuorma			
- epäedullinen	1,10	1,35	1,00
- edullinen	0,90	1,00	1,00
Muuttuva kuorma			
- epäedullinen	1,50	1,50	1,30

Esistandardin suomalaisen version taulukossa 9.2 esiintyy virheellisesti termi pysyvä ja tilapäinen tilanne. Tekstiosassa puhutaan kuitenkin pitkäaikaisesta ja tilapäisestä tilanteesta. Esistandardin mukaan murtorajatilan pitkäaikainen tilanne tarkoittaa tavanomaisia käyttöolosuhteita ja tilapäinen tilanne tilapäisiä olosuhteita, joita ovat esimerkiksi rakenteen toteutus ja korjaus.

Eurocode 7 antaa tapaukselle A erilaiset osavarmuusluvut. Eurocode 7 mukaan epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku on 1,00 ja edullisen 0,95. Muut kuormien osavarmuusluvut ovat Eurocode 7 mukaan samat kuin Eurocode 1, Osan 1 antamat arvot.

Mitoituskuorman kaavassa (3.4) esiintyy muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kerroin  $\psi_0$ . Rakennuksille  $\psi_0$ -kerroimet annetaan Eurocode 1, Osan 1 taulukossa 9.3. Kertoimia käytetään kuormien yhdistelyssä osoittamaan pienentynyttä todennäköisyyttä muuttuvien kuormien yhtäaikaiselle esiintymiselle. Taulukossa 3.2 on esitetty murtorajatilan yhdistelmäarvon kertoimet, joita käytetään, kun lasketaan pitkäaikaisen ja tilapäisen tilanteen mitoituskuorma.



Taulukko 3.2. Muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet  $\psi_0$  rakennuksille Eurocode 1, Osan 1 mukaan.

Kuorma	$\psi_0$
Rakennusten hyötykuormat	
Luokka A: asuinrakennukset	0,7
Luokka B: toimistot	0,7
Luokka C: kokoontumistilat	0,7
Luokka D: myymälät	0,7
Luokka E: varastot	1,0
Liikennekuormat rakennuksissa	
Luokka F: ajoneuvokuorma $\leq 30$ kN	0,7
Luokka G: $30$ kN $<$ ajoneuvokuorma $\leq 160$ kN	0,7
Luokka H: katot	0
Rakennusten lumikuormat	0,6
Rakennusten tuulikuormat	0,6
Rakennusten lämpötila (ei tulipalo)	0,6

Eurocode 1, Osassa 1 huomautetaan, että lumi- ja tuulikuormien osalta voidaan  $\psi_0$ -kertoimia muuttaa tarpeen mukaan erilaisilla maantieteellisillä alueilla.

Eurocode 1, Osan 1 mukaan voidaan rakennuksille pitkäaikaisten tilanteiden mitoituskuorma laskea yksinkertaistetun tarkastelun mukaan. Tässä tutkimuksessa käsitellään siltojen perustusten mitoitusta, jolloin yksinkertaistettua kuormien yhdistelyä ei käytetä.

Laskentaesimerkkien mitoituksissa, joissa mitoituskuorma lasketaan Eurocode 1, Osan 1 mukaan tuulikuorman yhdistelmäarvon kertoimena käytetään arvoa 0,6 ja muiden muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimena 0,7. Laskentaesimerkkien kuormien yhdistelytaulukkoissa muuttuvien kuormien kohdalla esiintyvät arvot ovat muuttuvan kuorman osavarmuusluvun ja yhdistelmäarvon kertoimen tulo. Esimerkiksi mitoitusapauksen B (Euro 1-1 B) muuttuvan kuorman osavarmuusluku on 1,5 ja tuulikuorman yhdistelmäarvon kerroin 0,6. Laskentaesimerkkien kuormien yhdistelytaulukkoissa esiintyvä arvo on näiden lukujen tulo 0,9.

Eurocode 1, Osan 1 mukaan rakenteen painumat lasketaan käyttörajatilassa. Esistandardin mukaan käyttörajatilamitoituksessa kuormien osavarmuusluvut ovat 1,0 ellei muissa ohjejärjestelmän osissa toisin määrätä. Käyttörajatilanteita on kolme - pysyvä, palautuva ja pitkäaikainen tilanne. Perustuksen painuma on muodonmuutos, joka kestää koko rakenteen käyttöiän, joten mitoituskuorma lasketaan pitkäaikaisen tilanteen mukaan. Mitoituskuorma voidaan laskea kaavasta (3.5).

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{kj} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} Q_{ki}, \quad (3.5)$$

missä

$G_{kj}$  on pysyvän kuorman  $j$  ominaisarvo,

$Q_{ki}$  on muuttuvan kuorman  $i$  ominaisarvo ja

$\psi_{2i}$  on muuttuvan kuorman  $i$  pitkäaikaisen arvon kerroin

Muuttuvan kuorman pitkäaikaisen arvon kertoimet on esitetty Eurocoden 1, Osan 1 taulukossa 9.3. Taulukossa 3.3 esitetään Eurocode 1, Osan 1 antamat  $\psi_2$ -kertoimet.

Taulukko 3.3. Muuttuvien kuormien pitkäaikaisen arvon kertoimet  $\psi_2$  rakennuksille Eurocode 1, Osan 1 mukaan.

Kuorma	$\psi_2$
Rakennusten hyötykuormat	
Luokka A: asuinrakennukset	0,3
Luokka B: toimistot	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,6
Luokka D: myymälät	0,6
Luokka E: varastot	0,8
Liikennekuormat rakennuksissa	
Luokka F: ajoneuvokuorma $\leq 30$ kN	0,6
Luokka G: $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvokuorma} \leq 160$ kN	0,3
Luokka H: katot	0
Rakennusten lumikuormat	0
Rakennusten tuulikuormat	0
Rakennusten lämpötila (ei tulipalo)	0

### 3.2.2 Eurocode 1, Osan 1 kansallinen soveltamisasiakirja /27/

Eurocode 1, Osan 1 kansallinen soveltamisasiakirja antaa murtorajatilassa tapauksille A, B ja C ohjeet, joiden perusteella kuormat yhdistetään. Perustuksen kantokyvyn ja paalun kantavuuden laskennassa käytettävät mitoituskuormat saadaan murtorajatilamitoituksen pitkä- ja väliaikaisia kuormia sisältävien mitoitus tilanteiden mukaan. Kansallinen soveltamisasiakirja puhuu pitkä- ja väliaikaisesta tilanteesta ja esistandardi pitkäaikaisesta ja tilapäisestä tilanteesta. Tämä aiheuttaa käyttäjän kannalta sekavuutta.

Kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan murtorajatilan mitoituskuorma lasketaan kaavan (3.4) perusteella. Tapausten A, B ja C pitkä- ja väliaikaisia kuormia sisältävien mitoitus tilanteiden osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 3.4.

Taulukko 3.4. Kuormien osavarmuusluvut pitkä- ja väliaikaisia kuormia sisältäville tilanteille Eurocode 1, Osan 1 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

Kuorma	Tapaus A	Tapaus B	Tapaus C
Pysyvä kuorma			
- epäedullinen	1,10	1,20	1,00
- edullinen	0,90	1,00	1,00
Muuttuva kuorma			
- epäedullinen	1,50	1,50	1,30

Tapauksen B mitoituskuorman laskennassa on otettava huomioon, että mitoituskuorman pitää olla vähintään kaavan (3.6) mukainen.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} 1,35 G_{kj} \quad (3.6)$$

Eurocode 1, Osan 1 kansallinen soveltamisasiakirja antaa erilaisen osavarmuusluvun tapauksen B epäedullisille pysyvälle kuormalle kuin Eurocode 1, Osa 1. Kansallinen soveltamisasiakirja antaa myös muuttuvan kuormien yhdistelmäarvon kertoimille erilaisia arvoja kuin edellä. Kansallisen soveltamisasiakirjan mukaiset muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet  $\psi_0$  on esitetty taulukossa 3.5.

*Taulukko 3.5.* Talonrakennuksessa käytettävät muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet  $\psi_0$  Eurocode 1, Osan 1 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

Kuorma	$\psi_0$
Rakennusten hyötykuormat	
Luokka A: asuinrakennukset	0,7
Luokka B: toimistot	0,7
Luokka C: kokoontumistilat	0,7
Luokka D: myymälät	0,7
Luokka E: varastot	1,0
Liikennekuormat rakennuksissa	
Luokka F: ajoneuvokuorma $\leq 30$ kN	0,7
Luokka G: $30$ kN $<$ ajoneuvokuorma $\leq 160$ kN	0,7
Luokka H: katot	0
Rakennusten lumikuormat	0,7
Rakennusten tuulikuormat	0,5
Rakennusten lämpötila (ei tulipalo)	0,6

Kansallisen soveltamisasiakirjan muutokset  $\psi_0$ -kertoimiin koskevat rakennusten lumi- ja tuulikuormia. Kansallisessa soveltamisasiakirjassa Suomen olosuhteet on huomioitu korottamalla lumikuorman kerroin 0,6:sta 0,7 ja laskemalla tuulikuorman kerroin 0,6:sta 0,5.

Eurocode 1, Osan 1 kansallisessa soveltamisasiakirjassa on kumottu kohdat, joiden mukaan mitoituskuorman laskeminen voidaan tehdä yksinkertaistetulla menetelmällä.

Eurocode 1, Osan 1 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan pitkäaikaisen käyttörajatilamitoituksen mitoituskuorma lasketaan kaavan (3.5) mukaan. Kansallinen soveltamisasiakirja antaa muuttuvan kuorman pitkäaikaisen arvon kertoimet. Taulukossa 3.6 on annettu kansallisen soveltamisasiakirjan mukaiset  $\psi_2$ -kertoimet muuttuville kuormille.



Taulukko 3.6. Talonrakennuksessa käytettävät muuttuvien kuormien pitkäaikaisen arvon kertoimet  $\psi_2$  Eurocode 1, Osan 1 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

Kuorma	$\psi_2$
Rakennusten hyötykuormat	
Luokka A: asuinrakennukset	0,3
Luokka B: toimistot	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,3
Luokka D: myymälät	0,6
Luokka E: varastot	0,8
Liikennekuormat rakennuksissa	
Luokka F: ajoneuvokuorma $\leq 30$ kN	0,6
Luokka G: $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvokuorma} \leq 160 \text{ kN}$	0,3
Luokka H: katot	0
Rakennusten lumikuormat	0,2
Rakennusten tuulikuormat	0
Rakennusten lämpötila (ei tulipalo)	0

Kansallisessa soveltamisasiakirjassa on huomioitu Suomen olosuhteet korottamalla lumikuorman pitkäaikaisen arvon kerroin 0:sta 0,2 ja laskemalla rakennusten hyötykuormien luokan C kerroin 0,6:sta 0,3.

### 3.2.3 Eurocode 1, Osa 3 /6/

Eurocode 1, Osan 3: Siltojen liikennekuormat mukaan kuormat yhdistetään murtorajatilassa kaavan (3.4) mukaan. Liitteen C mukaan mitoitustapaukset B, rakenteen kestävyys ja C, maapohjan murtuminen on yhdistetty yhdeksi mitoitustapaukseksi kuormapuolella. Eurocode 1, Osassa 3 korvataan Eurocoden 1, Osan 1 taulukko 9.2 rakennusten osavarmuusluvut taulukolla C.1, jossa esitetään siltojen mitoituksessa käytettävät osavarmuusluvut. Perustuksen kantokyvyn ja paalun kantavuuden laskennassa käytetään taulukon 3.7 mukaisia osavarmuuslukuja.

Taulukko 3.7. Kuormien osavarmuusluvut pitkä- ja väliaikaisia kuormia sisältäville tilanteille Eurocode 1, Osan 3 mukaan.

Kuorma	Tapaukset B ja C
Pysyvä kuorma	
- epäedullinen	1,35
- edullinen	1,00
Liikennekuorma	
- epäedullinen	1,35
- edullinen	0
Muu muuttuva kuorma	
- epäedullinen	1,50
- edullinen	0

Eurocode 1, Osan 3 taulukossa C.2 on esitetty muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet. Siltaperustusten murtorajatilamitoituksessa käytettävät  $\psi_0$ -kertoimet on esitetty taulukossa 3.8. Eurocode 1, Osassa 3 lisätään vielä, että lumi- ja tuulikuormia ei yhdistetä raskaan erikoiskuorman eikä jarrukuor-

man kanssa tai muiden taulukon 3.8 ryhmään 2 tai ryhmään 5 kuuluvien kuormien kanssa.

Taulukko 3.8. Muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet  $\psi_0$  Eurocode 1, Osan 3 mukaan.

Kuorma	$\psi_0$
Liikennekuorma	
Ryhmä 1: viivakuorma	0,75
: tasainen kuorma	0,40
Ryhmä 2: vaakakuorma	0
Ryhmä 3: kevyen liikenteen kuorma	0
Ryhmä 4: henkilökuorma	0
Ryhmä 5: erikoiskuorma	0
Vaakakuorma	0
Tuulikuorma	0,3/1,0
Lämpötilan muutokset	0

Taulukon 3.8 ryhmän 1 kuormat vastaavat tielaitoksen liikennekuormakaavion 1 mukaista ominaiskuormaa. Eurocode 1, Osan 3 liikennekuorman ominaisarvon laskenta eroaa tielaitoksen liikennekuorman laskennasta. Laskentaesimerkeissä käytetään tielaitoksen ohjeen Siltojen kuormat mukaan laskettuja liikennekuormien ominaisarvoja. Kun kuormia yhdistetään laskentaesimerkeissä Eurocode 1, Osan 3 mukaan, kuormien osavarmuusluvut valitaan taulukosta 3.7 ja muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet taulukosta 3.8. Liikennekuormakaavion 1 mukaisen kuorman yhdistelmäarvon kertoimen arvona käytetään 0,575, joka on taulukon 3.8 ryhmän 1 antamien yhdistelmäarvon kertoimien keskiarvo. Kun tämä yhdistelmäarvon kerroin kerrotaan liikennekuorman osavarmuusluvulla 1,35 saadaan arvo 0,78, joka esiintyy laskentaesimerkkien kuormien yhdistelytaulukoissa.

Taulukossa 3.8 annetaan tuulikuormalle kaksi yhdistelmäarvon kerrointa. Kertoimen arvo riippuu tuulikuorman ominaisarvon laskentatavasta. Liitteiden laskentaesimerkeissä tuulikuorman ominaisarvo on vakio, joka on laskettu tielaitoksen ohjeiden mukaan. Yhdistelmäarvon kertoimenä käytetään jälkimmäistä arvoa, jonka antama tulos on varmalla puolella.

Mitoituskuorma, joka aiheuttaa perustuksen painuman lasketaan käyttörajatilassa. Eurocode 1, Osan 3 mukaan pitkäaikaisen käyttörajatilamitoituksen mitoituskuorma lasketaan kaavan (3.5) mukaan. Taulukossa 3.9 on annettu Osan 3 mukaiset muuttuvien kuormien pitkäaikaisen arvon  $\psi_2$ -kertoimet.



Taulukko 3.9. Muuttuvien kuormien pitkäaikaisen arvon  $\psi_2$ -kertoimet Eurocode 1, Osan 3 mukaan.

Kuorma	$\psi_2$
Liikennekuorma	
Ryhmä 1: viivakuorma	0
: tasainen kuorma	0
Ryhmä 2: vaakakuorma	0
Ryhmä 3: kevyen liikenteen kuorma	0
Ryhmä 4: henkilökuorma	0
Ryhmä 5: erikoiskuorma	0
Vaakakuorma	0
Tuulikuorma	0
Lämpötilan muutokset	0,5

### 3.3 MAAN MITOITUSLUJUUS PERUSTUKSEN KANTOKYVYN LASKENNASSA

#### 3.3.1 Tielaitoksen ohje /23/

Tielaitoksen julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan maanvaraisen perustuksen kantokykyä laskettaessa kitkamaan lujuuden mitoitusarvo saadaan käyttäen maan kitkakulman tangentille osavarmuuslukua  $\gamma_\phi = 1,25$ . Täyteen varaan perustettaessa voidaan kitkakulman tangentille käyttää osavarmuuslukua  $\gamma_\phi = 1,2$ . Maanpaine lasketaan kuitenkin käyttäen maan kitkakertoimen ominaisarvoa.

Maanvaraisen perustuksen painuman laskennassa käytetään maan lujuuden ominaisarvoa.

#### 3.3.2 Eurocode 7 /7, 16/

Eurocode 7 antaa geoteknisessä suunnittelussa käytettävät maan lujuusparametrien osavarmuusluvut murto- ja käyttörajatilassa. Perustuksen painuma lasketaan käyttörajatilassa. Käyttörajatilassa osavarmuusluvut saavat arvon 1,0. Maanvaraisen perustuksen kantokyky lasketaan murtorajatilassa. Murto-rajatilan osavarmuuslukujen arvot riippuvat mitoitusapauksesta. Taulukossa 3.10 on annettu Eurocode 7 antamat osavarmuusluvut murtorajatilassa maan kitkakulman tangentille  $\tan \phi$ , tehokkaalle koheesiolle  $c'$ , suljetulle leikkauslujuudelle  $c_u$  ja maan tai kallion puristuslujuudelle  $q_u$ .

Taulukko 3.10. Maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut murtorajatilassa Eurocode 7 mukaan.

Tapaus	$\tan \phi$	$c'$	$c_u$	$q_u$
Tapaus A	1,1	1,3	1,2	1,2
Tapaus B	1,0	1,0	1,0	1,0
Tapaus C	1,25	1,6	1,4	1,4

### 3.3.3 Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja /28/

Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja antaa eri osavarmuusluvut kuin Eurocode 7 mitoitus tapauksen C maaperän ominaisuuksille. Kansallisen soveltamisasiakirjan antamat arvot on esitetty taulukossa 3.11.

*Taulukko 3.11.* Tapauksen C maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvut murtorajatilassa Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

Tapaus	$\tan \phi$	$c'$	$c_u$	$q_u$
Tapaus C	1,25	1,6	1,55	1,6

Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja ottaa huomioon maaperän ominaisuuksien osavarmuusluvuissa rakenteen murtumisesta aiheutuvien vahinkojen laajuuden. Suunnittelija voi pienentää tai suurentaa osavarmuuslukuja taulukon 3.12 mukaan.

*Taulukko 3.12.* Maaperän ominaisuuksien osavarmuuslukujen pienentäminen tai suurentaminen vahinkojen laajuuden perusteella murtorajatilassa Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

Vahinkojen laajuus	$\tan \phi$	$c'$	$c_u$	$q_u$
Vähäinen	- 10%	- 10%	- 15%	- 15%
Suuri	+ 10%	+ 10%	+ 20%	+ 20%

## 3.4 PAALUN GEOTEKNISEN KANTAVUUDEN MITOITUSARVO

### 3.4.1 Tielaitoksen ohje /21, 26/

Sallittujen jännitysten menetelmällä paalun geoteknisen kantavuuden määrittämisessä käytetään kokonaisvarmuuskerrointa. Paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun murtokuorma kokonaisvarmuuskertoimella. Kokonaisvarmuuskerroin riippuu murtokuorman määrittämenetelmästä. Taulukossa 3.13 on esitetty ohjeen Teräspalkkipaalut mukaan käytettävät kokonaisvarmuuskertoimet.

*Taulukko 3.13.* Paalun geoteknisen kantavuuden määrittämisessä käytettävät kokonaisvarmuuskertoimet julkaisun Teräspalkkipaalut mukaan.

Geoteknisen murtokuorman määrittämenetelmä	Kokonaisvarmuuskerroin
Staattiset kantavuuskaavat	2,5 - 3,0
Kairausvastukseen perustuvat menetelmät	2,5 - 3,0
Dynaamiset paalutuskaavat	2,5 - 3,0
Dynaaminen koekuormitus	2,0
Staattinen koekuormitus	1,8

Rajatilamitoituksessa paalun geoteknisen kantavuuden määrittämisessä käytettävät varmuusluvut on esitetty julkaisussa Suurpaalutusohje RIL 212-1995. Paalun geoteknisen kantavuuden ominaisarvo saadaan jakamalla paalun mur-



tokuorma  $\xi$ -kertoimella.  $\xi$ -kertoimen arvo riippuu käytetystä mitoitusmenetelmästä. Staattisesti tai dynaamisesti koekuormitettujen paalujen  $\xi$ -kertoimet saadaan taulukosta 3.14.

Taulukko 3.14. Koekuormitettujen paalujen  $\xi$ -kertoimet Suurpaalutusohjeen mukaan.

Koekuormitettujen paalujen lukumäärä	< 10%	≥ 10 %	≥ 25 %	≥ 50 %	100 %
Staattiset koekuormitukset					
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn keskiarvolle	1,35	1,30	1,25	1,20	1,10
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn alimmalle arvolle	1,25	1,20	1,15	1,10	1,00
Dynaamiset koekuormitukset					
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn keskiarvolle	1,50	1,45	1,40	1,35	1,25
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn alimmalle arvolle	1,40	1,35	1,30	1,25	1,15

Taulukon 3.14 mukaisia  $\xi$ -kertoimia voi käyttää, jos paaluja on koekuormitettu vähintään kaksi. Jos paalun murtokuorma on määritetty muilla menetelmillä,  $\xi$ -kertoimen arvo on 1,6.

Rajatilamenetelmällä paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla. Osavarmuusluku riippuu paalutyypistä. Taulukossa 3.15 on esitetty Suurpaalutusohjeen antamat osavarmuusluvut.

Taulukko 3.15. Paalujen osavarmuusluvut.

Paalutyyppi	Kärkivastus $\gamma_k$	Vaippavastus $\gamma_s$	Kokonaisvastus $\gamma_t$
Lyöntipaalu	1,3	1,3	1,3
Kaivinpaalu	1,6	1,3	1,5

Taulukon 3.3 viimeisen sarakkeen osavarmuuslukuja  $\gamma_t$  käytetään, jos paalun kärki- ja vaippavastusta ei voida määrittää erikseen.

### 3.4.2 Eurocode 7 /7, 16/

Eurocode 7 antaa murtorajatilamitoituksessa käytettävät paalun geoteknisen kantavuuden osavarmuusluvut sekä  $\xi$ -kertoimet. Paalun murtokuormasta saadaan kantavuuden ominaisarvo jakamalla murtokuorma  $\xi$ -kertoimella.  $\xi$ -kertoimen arvo riippuu käytetystä mitoitusmenetelmästä. Eurocode 7 antamat staattisesti tai dynaamisesti koekuormitettujen paalujen  $\xi$ -kertoimet saadaan taulukosta 3.16.

Taulukko 3.16. Koekuormitettujen paalujen  $\xi$ -kertoimet Eurocode 7 mukaan.

Koekuormitettujen paalujen lukumäärä	1	2	> 2
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn keskiarvolle	1,5	1,35	1,3
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn alimmalle arvolle	1,5	1,25	1,1

Jos paalun murtokuorma on määritetty muilla mitoitusmenetelmillä,  $\xi$ -kertoimen arvo on 1,5.

Paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla. Osavarmuusluku riippuu paalutyypistä. Taulukossa 3.17 on esitetty Eurocode 7 antamat osavarmuusluvut eri paalutyypeille.

Taulukko 3.17. Paalujen osavarmuusluvut Eurocode 7 mukaan.

Paalutyyppi	Kärkivastus $\gamma_k$	Vaippavastus $\gamma_s$	Kokonaisvastus $\gamma_i$
Lyöntipaalu	1,3	1,3	1,3
Kaivinpaalu	1,6	1,3	1,5
CFA-paalu	1,45	1,3	1,4

Taulukon 3.17 viimeisen sarakkeen osavarmuuslukuja  $\gamma_i$  käytetään, jos paalun kärki- ja vaippavastusta ei voida määrittää erikseen.

### 3.4.3 Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja /28/

Eurocode 7 kansallinen soveltamiskirja antaa taulukon, jossa annetaan mitoituksessa käytettävät  $\xi$ -kertoimet staattisille ja dynaamisille koekuormituksille. Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan antamat  $\xi$ -kertoimet koekuormitetuille paaluille ovat samat kuin Suurpaalutusohjeen mukaiset kertoimet. Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaiset  $\xi$ -kertoimien arvot on esitetty taulukossa 3.14.

Kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan taulukon 3.14  $\xi$ -kertoimia voi käyttää, jos paaluja on koekuormitettu vähintään kaksi. Jos paalun murtokuorma on määritetty muilla mitoitusmenetelmillä,  $\xi$ -kertoimen arvo on 1,6.

Eurocode 7 kansallinen soveltamisasiakirja antaa paaluille samat osavarmuusluvut kuin Eurocode 7. Kansallisen soveltamisasiakirjan mukaiset osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 3.17.

## 4 MAANVARAISEN PERUSTUKSEN GEOTEKNINEN MITOITUS

Tässä luvussa käsitellään maanvaraisen perustuksen geoteknistä mitoitusta tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa ja CEN:n esistandardin Eurocode 7 ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

### 4.1 PERUSTUKSEN KANTOKYKY

Maanvaraisen perustuksen kantokyky voidaan laskea kantavuuskaavoilla, liukupinta-analyyseillä tai geotekniikan numeerisilla menetelmillä. Laskentaesimerkit 1 ja 2 liittyvät maanvaraisen perustuksen mitoitukseen. Niissä käytetyt kantokyvyn laskentamenetelmät ovat kantavuuskaavaan ja liukupinta-analyysiin perustuvia menetelmiä.

#### 4.1.1 Tielaitoksen ohje /13, 23, 20, 29/

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan varmuus maapohjan murtumista vastaan on riittävä, kun mitoituskuorman aiheuttama perustuksen tehokkaalle pinta-alalle laskettu keskimääräinen pohjapaine ei ylitä kantavuuskaavalla laskettua maapohjan kantokykyä. Ohjeen mukainen kantavuuskaava perustuu DIN-normin 4017 kitkamaan kantavuuskaavaan. Kantavuuskaava on voimassa matalaan perustetuille anturoille, joissa  $D \leq 2,5 B_t$ . Ohjeen mukainen maapohjan kantokyky  $\sigma_{of}$  lasketaan kantavuuskaavalla (4.1).

$$\sigma_{of} = \gamma_1' D N_D s_D i_D + \gamma_2' B_t N_B s_B i_B, \quad (4.1)$$

missä

$\gamma_1'$	on maan tehokas tilavuuspaino perustamistason yläpuolella,
$\gamma_2'$	on maan tehokas tilavuuspaino perustamistason alapuolella,
$D$	on perustamissyvyys,
$B_t$	on perustuksen tehokas leveys murtosuunnassa,
$i_D$ ja $i_B$	ovat kuormitusresultantin kaltevuudesta riippuvat kertoimet,
$s_D$ ja $s_B$	ovat perustuksen muodosta riippuvat kertoimet ja
$N_D$ ja $N_B$	ovat kantavuuskertoimet.

Kantavuuskertoimet  $N_D$  ja  $N_B$  riippuvat maan kitkakulmasta. Maan kitkakulmaa arvioitaessa otetaan huomioon perustuksen alapinnasta tehokkaan leveyden syvyyteen ulottuvan kerroksen ominaisuudet. Tasalaatuisen maan kantavuuskertoimet lasketaan kaavoista (4.2) ja (4.3).

$$N_D = e^{\pi \tan \phi_n} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_n}{2} \right) \quad (4.2)$$

$$N_B = (N_D - 1) \tan \phi_n, \quad (4.3)$$



missä

$\phi_n$  on kitkakulman mitoitusarvo.

Perustuksen muodon ja kuormien resultantin kaltevuuden vaikutus otetaan huomioon kertoimilla  $s_D$ ,  $s_B$ ,  $i_D$  ja  $i_B$ . Kertoimien arvot riippuvat kuormien vaakaresultantin suunnasta. Perustapauksessa resultantin vaakakomponentti vaikuttaa perustuksen lyhyemmän sivun suunnassa ja perustuksen muodosta riippuvat kertoimet lasketaan kaavoista (4.4) ja (4.5).

$$s_D = 1 + \sin \phi_n \frac{B_t}{L_t} \quad (4.4)$$

$$s_B = 1 - 0,3 \frac{B_t}{L_t}, \quad (4.5)$$

missä

$B_t$  on perustuksen lyhyemmän sivun tehokas leveys ja  
 $L_t$  on perustuksen pidemmän sivun tehokas leveys.

Kuorman resultantin kaltevuudesta riippuvat kertoimet lasketaan kaavoista (4.6) ja (4.7).

$$i_D = (1 - 0,7 \frac{H}{V})^3 \quad (4.6)$$

$$i_B = (1 - \frac{H}{V})^3, \quad (4.7)$$

missä

$H$  on resultantin vaakakomponentti lyhyemmän sivun suunnassa ja  
 $V$  on resultantin pystykomponentti.

Jos suuri vaakakuorma vaikuttaa pidemmän sivun suunnassa, on perustuksen kantokyky tarkastettava myös toisessa suunnassa. Kun lasketaan kantavuutta pidemmän sivun suunnassa, kantavuuskaavassa esiintyvä  $B_t$  korvataan  $L_t$ :llä. Muotokertoimet saadaan silloin kaavoista (4.8) ja (4.9).

$$s_D = 1 + \sin \phi_n \quad (4.8)$$

$$s_B = 0,7 \quad (4.9)$$

Jos resultantin vaakakomponentti vaikuttaa pidemmän sivun suunnassa ja sivusuhte  $L/B > 2$ , saadaan kaltevuuskertoimet kaavasta (4.10).

$$i_D = i_B = 1 - \frac{H}{V} \quad (4.10)$$

Jos sivusuhte on  $1 < L/B < 2$ , voidaan kaltevuuskertoimet laskea esimerkiksi julkaisun Pohjarakenteet RIL 166 mukaan. Julkaisun Pohjarakenteet mukaan kaltevuuskertoimet voidaan käytännössä interpoloida tapausten  $L/B=1$  ja  $L/B=2$  välillä.

Keskimääräisen pohjapaineen laskennassa käytetään tehokasta pinta-alaa. Tehokas pinta-ala  $A_t = B_t L_t$  on kuviteltu pinta-ala, joka on kuormitettu keskeisesti. Tehokas pituus ja leveys lasketaan suorakaidepinta-alalle kaavoilla (4.11) ja (4.12).

$$L_t = L - 2e_L \quad (4.11)$$

$$B_t = B - 2e_B, \quad (4.12)$$

missä

- $L$  on perustuksen pituus,
- $B$  on perustuksen leveys,
- $e_L$  on kuormien epäkeskeisyys perustuksen pituuden suunnassa ja
- $e_B$  on kuormien epäkeskeisyys perustuksen leveyden suunnassa.

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan perustuksen kantokykyä laskettaessa huomioon otetaan myös pohjaveden pinnan aseman vaikutus. Jos ylin pohjavedenpinta on etäisyydellä  $z_w \leq B_t$  perustamistasosta mitattuna, lasketaan kantavuuskaavassa käytettävä tilavuuspaino kaavan (4.13) mukaan.

$$\gamma_2' = \gamma' + \frac{z_w}{B_t} (\gamma - \gamma'), \quad (4.13)$$

missä

- $\gamma$  on maan tilavuuspaino pohjavedenpinnan yläpuolella ja
- $\gamma'$  on maan tehokas tilavuuspaino pohjavedenpinnan alapuolella.

Ohjeen mukaan kantavuuskaavalla vaakasuoralle maanpinnalle laskettua kantokykyä on pienennettävä kertoimella  $g$ , jos maanpinta on kalteva. Pienennyskertoimen  $g$  arvo voidaan laskea kaavasta (4.14).

$$g = (1 - 0,5 \tan \beta)^5, \quad (4.14)$$

missä

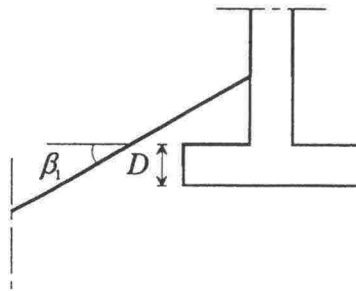
- $\beta$  on luiskan kaltevuus vaakatasoon suhteen (kuvasta 4.1).

Kaltevuuskorjaus voidaan laskea kahdella vaihtoehtoisella tavalla. Vaihtoehtoiset tavat on esitetty kuvassa 4.1. Perustuksen kantokyky lasketaan kantavuuskaavalla, johon sijoitetaan tapojen 1 ja 2 mukainen perustamissyvyys  $D$ . Kaltevan maan mitoituskantokyky saadaan käyttämällä tapojen 1 ja 2 antamia pienennyskertoimia. Mitoituskantokyvyksi valitaan suurempi lasketuista arvoista.

Laskentatapa 1:

perustussyvyys kuvan mukaisesti

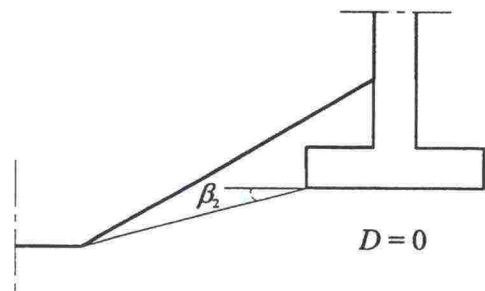
$$\beta = \beta_1$$



Laskentatapa 2:

perustussyvyys = 0

$$\beta = \beta_2$$



Kuva 4.1 Kalteva maanpinta, laskentatavat 1 ja 2.

Zadrogan ja Hartikaisen empiirisen kaavan mukaan tielaitoksen kaavan (4.14) kerroin 0,5 pitäisi olla 0,4, koska piennyskerroin  $g$  pudottaa perustuksen kantokyvyn pienemmäksi kuin mitä saavutettiin koesarjoilla, jotka tehtiin Puolassa ja Suomessa.

Empiirisen tutkimuksen mukaan luiskavaraisen perustuksen kantokyky voidaan laskea kantavuuskaavalla ja kantokykyä pienentää kertoimella  $g$ , jos perustus on maanvarainen ja perustettu kitkamaalle.

#### 4.1.2 Eurocode 7 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja /7, 16, 28/

Eurocode 7 luvussa 6 käsitellään maanvaraisten perustusten geoteknistä suunnittelua. Perustusten kantokyky lasketaan murtorajatilassa. Kantokyky voidaan määrittää analyyttisellä tai puolikokeellisella menetelmällä. Eurocode 7 informatiivisessa liitteessä B on esimerkki analyyttisestä menetelmästä perustuksen kantokyvyn laskemiseksi. Liitteen mukaan muitakin kantokyvyn laskennan likiarvomenetelmiä voidaan käyttää.

Eurocode 7 liitteessä B on esitetty kantavuuskaavat, joiden avulla voidaan laskea perustuksen kantokyky suljetussa ja avoimessa tilassa. Kun siltojen maanvaraiset perustukset tehdään kitkamaalle tai täytteelle, mitoituksessa käytetään avoimen tilan kantavuuskaavaa. Avoimessa tilassa perustuksen kantokyky lasketaan kaavan (4.15) mukaan. Kantokyvyn laskennassa käytetään maan tehokkaita lujuusparametrejä.

$$\frac{R}{A'} = c' N_c s_c i_c + q' N_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma, \quad (4.15)$$

missä

$R$	on pystysuorien voimien resultantti,
$A'$	on perustuksen tehokas pinta-ala,
$c'$	on tehokas koheesio,
$q'$	on tehokas mitoituspaine perustamistasolla,



$\gamma'$	on tehokas tilavuuspaino perustamistason alapuolella,
$B'$	on perustuksen tehokas leveys,
$s_c, s_q$ ja $s_\gamma$	ovat perustuksen muotokertoimet,
$i_c, i_q$ ja $i_\gamma$	ovat kuormituksen kaltevuudesta riippuvat kertoimet ja
$N_c, N_q$ ja $N_\gamma$	ovat kantavuuskertoimet.

Kantavuuskertoimet lasketaan kaavojen (4.16), (4.17) ja (4.18) mukaan.

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (4.16)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (4.17)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi' \quad \text{kun } \delta \geq \frac{\phi'}{2} \text{ (karhea pohja),} \quad (4.18)$$

missä

$\phi'$	on kitkakulman mitoitusarvo ja
$\delta$	on pohjan kitkakulman mitoitusarvo.

Perustuksen muodosta aiheutuvat kertoimet lasketaan kaavojen (4.19)-(4.24) mukaan.

Suorakaiteen muotoinen perustus:

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi' \quad (4.19)$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \frac{B'}{L'}, \quad (4.20)$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad (4.21)$$

Neliön tai ympyrän muotoinen perustus:

$$s_q = 1 + \sin \phi' \quad (4.22)$$

$$s_\gamma = 0,7 \quad (4.23)$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad (4.24)$$

missä

$B'$	on perustuksen tehokas leveys ja
$L'$	on perustuksen tehokas pituus.

Kun vaakavoima on yhdensuuntainen pidemmän sivun  $L$  kanssa, resultantin kaltevuuskertoimet lasketaan kaavojen (4.25) ja (4.26) mukaan.

$$i_q = i_\gamma = 1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \phi'} \quad (4.25)$$

$$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}, \quad (4.26)$$

missä

$H$  on kuorman vaakaresultantti.

Kun vaakavoima on yhdensuuntainen lyhyemmän sivun  $B$  kanssa, resultantin kaltevuuskertoimet voidaan laskea kaavoista (4.27), (4.28) ja (4.29).

$$i_q = (1 - 0,7 \frac{H}{V + A' c' \cot \phi'})^3 \quad (4.27)$$

$$i_\gamma = (1 - \frac{H}{V + A' c' \cot \phi'})^3 \quad (4.28)$$

$$i_c = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad (4.29)$$

Eurocode 7 mukainen perustuksen tehokas pinta-ala on sama kuin perustuksen ala tai epäkeskeisen kuormituksen tapauksessa perustuksen redusoitu pinta-ala, jonka keskuksena on kuormitusresultantin vaikutuspiste.

Liitteen B lopussa mainitaan, että perustuksen suunnittelussa olisi huomioon otettava perustamissyvyys sekä maanpinnan ja perustuksen pohjan kaltevuus. Näiden tekijöiden huomioon ottamiseksi ei kuitenkaan ole annettu laskentaohjeita.

Eurocode 7 kansallisessa soveltamisasiakirjassa on annettu lisäyksiä esistandardin tekstiin mm, että perustuksen kantokyky voidaan määrittää myös liukupinta-analyysillä. Eurocode 7 informatiiviseen liitteeseen B ei ole tehty lisäyksiä.

## 4.2 PERUSTUKSEN PAINUMINEN

Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa ja Eurocode 7 antavat likimääräisiä laskentamenetelmiä perustuksen painuman laskemiseen. Laskentaesimerkeissä ei lasketa perustuksen painumaa. Tässä luvussa esitetään kuitenkin lyhyesti ohjeiden antamat painuman laskentamenetelmät.

### 4.2.1 Tielaitoksen ohje /23/

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan painumalaskelmaa ei tarvita, jos perustuksen tehokkaalle pinta-alalle laskettu pohjapaine alittaa ohjeessa annetun taulukon 3 arvot. Ohjeen taulukossa 3 esitetään maalajeittain pohjapaineen raja-arvo, jota suuremmilla arvoilla painumalaskelma tarvitaan. Raja-arvot vaihtelevat 0,2...0,6 MPa. Pienin raja-arvo on hienol-

la hiekalla ja suurin moreenilla. Ohjeen mukaan painumalaskelma tarvitaan kuitenkin aina, kun maan painumaominaisuudet ja kerrospaksuudet vaihtelevat merkittävästi tai kun sillassa on pitkiä jäniteitä ( $> 50$  m) tai korkeita pilareita.

Ohjeen mukaan sillat suunnitellaan siten, että tukien välillä sallitaan 10 mm painumaero. Maanvaraisesti perustettavalle sillalle voidaan sallia 20 mm arvioitu painuma. Painumaero määräytyy sillan päällysrakenteen salliman painuman mukaan. Tarvittaessa kokonaispainuman ja painumaerojen lisäksi on huomiotava epätasaisesta painumasta aiheutuva alusrakenteen kallistuminen.

Ohjeen mukaan luotettavimmin painumien suuruus voidaan arvioida kuormituskoe-, pressometrikoe- tai puristinkairaustulosten perusteella. Painumien suuruus voidaan laskea myös paino- tai heijarikairausvastuksien perusteella ja maalajimääritysten perusteella.

Tielaitoksen ohjeessa käsitellään tarkemmin kaksi likimääräistä painumalaskentamenetelmää: tangentialmoduuli- ja muodonmuutosmoduulimenetelmä.

Muodonmuutosmoduulimenetelmässä muodonmuutosmoduuli  $E_d$  määritetään kuormituskokeilla tai arvioidaan kairausvastuksista ja maalajimäärityksistä. Julkaisussa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa esitetään kairausvastuksen perusteella arvioidut muodonmuutosmoduulit.

Ohjeen mukaan perustuksen painuman  $s$  voi laskea kerroksittain kaavalla (4.30).

$$s = \frac{i_s q B}{E_d} c_T, \quad (4.30)$$

missä

- $i_s$  on perustuksen muotokerroin,
- $q$  on pohjapaine,
- $B$  on perustuksen leveys,
- $E_d$  on maapohjan muodonmuutosmoduuli ja
- $c_T$  on kerroin kokoonpuristuvan kerroksen paksuudelle.

Julkaisussa annetaan ohjeet perustuksen muotokertoimen ja kokoonpuristuvuuskertoimen laskemiseksi.

Tangentialmoduulimenetelmällä lasketaan maakerroksen suhteellinen kokoonpuristuma. Kerrosten suhteellisten kokoonpuristumien avulla lasketaan perustuksen kokonaispainuma. Kerroksen suhteellinen kokoonpuristuma  $\varepsilon_z$  voidaan laskea kaavalla (4.31). Kaavassa jännityseksponentin  $\beta$  arvo on 0,5 ja vertailujännityksen  $\sigma_v$  arvo on 100.

$$\varepsilon_z = \frac{0,2}{m_z} (\sqrt{\sigma_z} - \sqrt{\sigma_{cz}}), \quad (4.31)$$



missä

- $m_z$  on moduuliluku syvyydellä  $z$ ,
- $\sigma_z$  on perustuksen ja maan oman painon aiheuttama tehokas pystysuora normaalijännitys syvyydellä  $z$  ja
- $\sigma_{cz}$  on tehokas esikuormituksesta aiheutuva pystysuora normaalijännitys syvyydellä  $z$ .

Painumien laskemista varten maa on jaettava tasalaatuisiin maakerroksiin, joissa moduuliluku  $m_z$  voidaan otaksua vakioksi. Laskentakerroksen paksuus ei saa olla suurempi kuin laatan tehokas leveys. Lähinnä anturaa oleva maa on jaettava laskentakerroksiin, joiden paksuus on  $0,3 \dots 0,5 B_f$ .

Jännitys  $\sigma_{cz}$  on tehokas jännitys syvyydellä  $z$  ennen rakentamista. Tehokas pystysuora kokonaisjännitys  $\sigma_z$  saadaan lisäämällä tehokkaaseen jännitykseen perustuksesta aiheutuva lisäjännitys  $\Delta \sigma_z$ . Tielaitoksen julkaisussa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa annetaan ohjeet lisäjännityksen laskemiseksi.

#### 4.2.2 Eurocode 7 ja sen kansallinen soveltamisasiakirja /7, 16, 28/

Eurocode 7 mukaan tavanomaisten rakenteiden sallittu kokonaispainuma  $< 50$  mm ja vierekkäisten pilarien sallittu painumaero  $< 20$  mm.

Eurocode 7 mukaan painumalaskelmassa on otettava huomioon kokoonpuristuvat maakerrokset syvyydelle, jossa perustuksen kuorman aiheuttama tehokas pystysuora jännitys on 20 % maakerrosten painon aiheuttamasta tehokkaasta jännityksestä. Esistandardin mukaan yleensä voidaan arvioida, että syvyys on 1...2 kertaa perustuksen leveys.

Eurocode 7 informatiivisessä liitteessä D on esitetty esimerkkimenetelmä painuman arvioimiseksi. Painumien arvioimismenetelmiä on nimetty viisi, joita ovat jännitysmuodonmuutosmenetelmä, sovellettu kimmomenetelmä, painuminen ilman kuivatusta, konsolidaatiopainuma ja aika-painumakäyttäytyminen.

Liitteen D mukaan sovelletun kimmomenetelmän mukainen perustuksen kokonaispainuma voidaan arvioida kimmoteorian ja kaavaa (4.32) perusteella.

$$s = \frac{pBf}{E_m}, \quad (4.32)$$

missä

- $s$  on perustuksen kokonaispainuma,
- $p$  on perustuksen pohjapaine, jota redusoidaan normaalikonsolidoituneilla koheesiomailla,
- $B$  perustuksen leveys,

- $f$  on kerroin, jonka arvo riippuu perustuksen muodosta ja mitoista, jäykkyyden vaihtelusta syvyyden mukana, kokoonpuristuvan muodostuman paksuudesta, Poissonin luvusta, pohjapaineen ja kautumasta ja pisteestä, missä painuma lasketaan ja
- $E_m$  on maakerroksen mitoituskimmomoduuli, joka voidaan arvioida esimerkiksi laboratorio- tai in situ-kokeiden perusteella.

Esistandardissa kertoimelle  $f$  ei anneta edes likimääräisiä arvoja.

Muista painuman arviointimenetelmistä esitetään pääperiaatteet muutamalla rivillä sanallisesti. Niiden tarkempi selvittäminen ja käyttö on jätetty suunnittelijan harkittavaksi.

Eurocode 7 kansallisessa soveltamisasiakirjassa on annettu joitakin lisäyksiä esistandardiin painumien osalta. Kansallisessa soveltamisasiakirjassa kehoitetaan välttämään rakenteiden perustamista kokoonpuristuville hienorakeisille tai eloperäisille maapohjille. Liitteen D tekstiin on lisätty huomautus, jonka mukaan deformaatiomoduulia  $E_m$  määritettäessä mittaustulosten tulkinta tulee tehdä siten, että moduuli kuvaa tulevaa rakenteesta maahan kohdistuvaa lisäjännitystä.

## 5 PAALUN GEOTEKNINEN MITOITUS /7, 16, 23/

Paalun geotekninen mitoitus voidaan tehdä usealla eri menetelmällä. Mitoitusmenetelmä voi perustua maan lujuusparametreihin tai lyönnin energiatarkasteluihin. Käytettävät menetelmät riippuvat paalutyypistä. Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan paaluperustusten suunnittelussa noudatetaan julkaisuissa Lyöntipaalutusohjeet, Suurpaalutusohje ja Teräsputkipaalut esitettyjä ohjeita.

Eurocode 7 luvun 7 mukaan paaluperustuksien mitoitusmenetelmien tulee perustua staattisten kuormituskokeiden tuloksiin, empiirisiin tai analyttisiin laskentamenetelmiin tai dynaamisten kuormituskokeiden tuloksiin. Laskentamenetelmien ja dynaamisten kuormitustulosten paikkaansapitävyys tulee olla osoitettu staattisilla kuormituskokeilla. Esistandardi ei nimeä suunnittelussa käytettäviä mitoitusmenetelmiä, eikä anna mitoituksessa käytettäviä kaavoja tai mitoituskäyrästäjä. Eurocode 7 mukaan paaluperustuksien suunnittelussa käytettävät mitoitusmenetelmät jäävät suunnittelijan harkinnan varaan.

Laskentaesimerkit 3-7 käsittelevät paaluperustuksia. Vertailun vuoksi paalun murtokuorma lasketaan usealla eri menetelmällä. Paalun murtokuormasta lasketaan paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo ohjejärjestelmittäin luvun 3 mukaan.

### 5.1 STAATTISEEN KANTAVUUSKAAVAAN PERUSTUVA MENETELMÄ /21, 26/

Laskentaesimerkkien 3-7 paalujen murtokuormat on laskettu staattiseen kantavuuskaavaan perustuvalla menetelmällä. Murtokuormat lasketaan julkaisun Suurpaalutusohje RIL 212-1995 mukaan. Avoimien teräsputkipaalujen murtokuormat lasketaan vertailun vuoksi myös julkaisun Teräsputkipaalut mukaan. Molempien ohjeiden antamat laskentakaavat ovat samat, mutta ohjeiden antamat mitoituskäyrät eroavat toisistaan. Staattiseen kantavuuskaavaan perustuvalla menetelmällä paalun murtokuorma  $P_u$  saadaan kaavasta (5.1).

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p \quad (5.1)$$

missä

- $z$  on paalun maassa olevan osan pituus,
- $d$  on paalun halkaisija,
- $f_s$  on vaippavastus,
- $A_{pk}$  on paalun kärjen poikkileikkausala ja
- $q_p$  on kärkivastus.

Kaavan (5.1) ensimmäinen termi antaa paalun vaippakantavuuden ja jälkimmäinen paalun kärkikantavuuden.



Paalun kärkivastus  $q_p$  lasketaan kaavasta (5.2).

$$q_p = \sigma_{vp}' N_q \quad (5.2)$$

missä

$\sigma_{vp}'$  on tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla ja  
 $N_q$  on kantavuuskerroin.

Molempien ohjeiden mukaan tehokas pystysuora jännitys lasketaan ottamalla huomioon maakerrosten tehokas paino enintään  $10d$  paalun kärjen yläpuolella. Kantavuuskerroin saadaan ohjeiden mitoituskäyristä. Kantavuuskerroin on annettu kitkakulman ominaisarvon funktiona. Molempien ohjeiden mukaan kitkakulman ominaisarvo otetaan keskimääräisenä  $5d$  paalun kärjen yläpuolelta  $3d$  paalun kärjen alapuolelle. Julkaisun Teräsputkipaalut mukaan murto-kuorman laskennassa kitkakulman  $>40^\circ$  käyttö edellyttää kolmiaksiaalikokeita laboratoriossa tai in-situ kokeita. Ohjeessa mainitaan myös, että kärkivastukseksi voidaan ottaa enintään 20 MPa.

Molempien ohjeiden mukaan vaippavastus  $f_s$  saadaan kaavasta (5.3).

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \phi_a \quad (5.3)$$

missä

$K_s$  on maanpaine kerroin,  
 $\sigma_v'$  on tehokas pystysuora jännitys maassa ja  
 $\phi_a$  on paalun ja maan välinen kitkakulma.

Julkaisussa Suurpaalutusohje vaippavastuskerroin  $K_s \tan \phi_a$  annetaan kitkakulman funktiona. Ohjeessa Teräsputkipaalut maanpaine kerroin  $K_s$  annetaan kitkakulman funktiona ja kertoimen  $\tan \phi_a$  arvo on  $0,7 \tan \phi$ . Julkaisussa Suurpaalutusohje tehokkaan pystysuoran jännityksen arvo lasketaan siten, että paalun vaipalla otetaan huomioon maakerrosten paino enintään kymmentä paalun läpimittaa vastaavalta paksuudelta tarkastelukohdasta ylöspäin. Ohjeesta Teräsputkipaalut rajoitus puuttuu. Julkaisun Teräsputkipaalut mukaan vaippavastukseksi voidaan ottaa korkeintaan 0,15 MPa.

Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva mitoitusmenetelmä johtaa ylivarmoihin mitoituksiin, jos noudatetaan paalun kärjessä julkaisun Teräsputkipaalut antamaa rajoitusta  $\leq 40^\circ$  kitkakulmalle. Ylimääräistä varmuutta mitoituksiin aiheuttaa myös se, että kärkikantavuuden laskennassa käytettävä paalun kärjen kitkakulma lasketaan keskiarvona  $5d$  paalun kärjestä ylöspäin  $3d$  paalun kärjen alapuolelle, sillä kärjen yläpuolisen maan kitkakulman arvo vaikuttaa enemmän kärkikantavuuteen kuin kärjen alapuolisen maan kitkakulma. Vaippa- ja kärkikantavuuden laskennassa ylimääräistä varmuutta mitoitukseen antaa myös tehokkaan jännityksen laskennassa maan painon ottaminen huomioon vain  $10d$  tarkastelukohdasta ylöspäin.

## 5.2 KAIRAUSVASTUKSEEN PERUSTUVA MENETELMÄ /21, 26/

Kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä lasketaan paalun murtokuorma julkaisun Suurpaalutusohje mukaan. Laskentaesimerkkien 3 ja 4 avoimien teräsputkipaalujen murtokuormat lasketaan vertailun vuoksi myös ohjeen Teräsputkipaalut mukaan. Paalun murtokuorma lasketaan kaavalla (5.1).

Paalun kärki- ja vaippavastus saadaan ohjeiden mitoituskäyristä. Kärki- ja vaippavastus on annettu heijarikairausvastuksen funktiona. Kärkivastuksen laskennassa keskimääräinen heijarikairausvastus otetaan alkaen  $5d$  paalun kärjen yläpuolelta syvyyteen  $3d$  kärjen alapuolelle molempien ohjeiden mukaan.

## 5.3 DYNAAMISIIN PAALUTUSKAAVOIHIN PERUSTUVA MENETELMÄ /1, 12, 17, 26/

Dynaamiset paalutuskaavat perustuvat energiatarkasteluihin. Paalun kantavuutta arvioidaan lyöntivastuksen avulla. Laskentaesimerkkien 3-6 paalujen murtokuormat on laskettu viidellä dynaamisella paalutuskaavalla.

Weisbach'in dynaaminen paalutuskaava on esitetty julkaisussa Poulos: Pile foundation analysis and design. Weisbach'in mukaan paalun murtokuorma  $P_u$  lasketaan kaavalla (5.4).

$$P_u = -\frac{sAE_p}{L} + \sqrt{\frac{2wHAE_p}{L} + \left(\frac{sAE_p}{L}\right)^2} \quad (5.4)$$

missä

- $s$  on paalun painuma,
- $A$  on paalun poikkileikkausala,
- $E_p$  on paalun kimmokerroin,
- $L$  on paalun pituus,
- $w$  on järkäleen paino ja
- $H$  on järkäleen pudotuskorkeus.

Danish, Hiley'n ja Janbu'n dynaamiset paalutuskaavat on esitetty julkaisussa Bowles: Foundation analysis and design. Hiley'n mukaan paalun murtokuorma  $P_u$  lasketaan kaavalla (5.5).

$$P_u = \frac{e_f w H}{s + (C_1 + C_2 + C_3) / 2} \cdot \frac{w + n^2 w_p}{w + w_p} \quad (5.5)$$

missä

- $e_f$  on järkäleen tehokkuuskerroin,
- $C_1$  on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmoinen muodonmuutos (0-5 mm),
- $C_2$  on paalun kimmoinen muodonmuutos,

- $C_3$  on maan kimmoinen muodonmuutos,  
 $n$  on joustokerroin ja  
 $w_p$  on paalun paino.

Janbu'n mukaan paalun murtokuorma  $P_u$  lasketaan kaavalla (5.6).

$$P_u = \frac{wH}{k_u s} \quad (5.6)$$

Kaavassa (5.6) tarvittavat apukertoimet voidaan laskea kaavoista (5.7), (5.8) ja (5.9)

$$k_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda_e / C_d}) \quad (5.7)$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 w_p / w \quad (5.8)$$

$$\lambda_e = \frac{wHL}{AE_p s^2} \quad (5.9)$$

Danish dynaaminen paalutuskaava (5.10) paalun murtokuorman  $P_u$  laskemiseksi on muotoa

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + \sqrt{e_f wHL / 2AE_p}} \quad (5.10)$$

Gatesin dynaaminen paalutuskaava on esitetty tielaitoksen julkaisussa Teräsputkipaalut. Gates'in mukaan paalun murtokuorma  $P_u$  lasketaan kaavalla (5.11).

$$P_u = 96 \sqrt{e_f wH} (2,4 - \log s) \quad (5.11)$$

Laskentaesimerkin 7 teräsbetonipaalun murtokuorma on laskettu Lyöntipaalutusohjeen antamalla Krüger'in paalutuskaavalla. Krüger'in mukaan paalun murtokuorma  $P_u$  lasketaan kaavalla (5.12).

$$P_u = 0,8 \frac{kH}{s + c/2} w (1 - 0,1 \frac{w_p}{w}) \quad (5.12)$$

missä

- $k$  on korjauskerroin ja  
 $c$  on paalun jousto.



#### **5.4 DYNAAMISIIN KOE KUORMITUKSIIN PERUSTUVA MENETELMÄ**

Laskentaesimerkkien 3-6 paalut on koekuormitettu. Dynaamiset koekuormitukset on tehnyt Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorio. Dynaamisilla koekuormituksilla ei ole määritetty paalujen suurinta murto-kuormaa. Koekuormitusten tarkoituksena on ollut varmistaa paalujen riittävä kantokyky paalujen mitoituskuorman suhteen. Laskentaesimerkeissä käytetään koekuormitusraporttien sekä tielaitoksen antamia kuorma ja pohjaolosuhde sekä paalujen upotukseen liittyviä tietoja. Koekuormitusraporteissa esitetyistä murtokuormista lasketaan paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo ohjejärjestelmittäin.

## 6 GEOTEKNISEN MITOITUKSEN TARKASTELU LASKENTAESIMERKKIEN POHJALTA

### 6.1 KÄYTETYT OHJEJÄRJESTELMÄT

Liitteiden laskentaesimerkkien vertailulaskelmat on tehty käyttäen seuraavia mitoistustapauksia ja ohjejärjestelmiä:

TIEL	Maanvaraisen perustuksen tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmän mukainen mitoitus: mitoituskuorma sekä geotekninen mitoitus julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan.
TIEL-sall	Tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmän mukainen mitoitus paaluperustukselle: mitoituskuorma julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan sekä geotekninen kantavuus julkaisujen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa, Luku 10, tarkistus ja Teräsputki-paalut mukaan. Paalun murtokuorma voi olla laskettu muiden julkaisujen perusteella.
TIEL-rajat	Tielaitoksen mukainen paaluperustuksen rajatilamitoitus: mitoituskuorma ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa, Luku 10, tarkistus mukaan ja paalujen geotekninen kantavuus julkaisun Suurpaalutusohje mukaan.
Euro 1-3 B	Eurocode-ohjejärjestelmän mukainen mitoistustapaus B, jolloin mitoituskuorma saadaan Eurocode 1, Osan 3 (siltoja koskeva ohje) mukaan ja geotekninen mitoitus Eurocode 7 mukaan.
Euro 1-3 C	Eurocode-ohjejärjestelmän mukainen mitoistustapaus C, jolloin mitoituskuorma saadaan Eurocode 1, Osan 3 (siltoja koskeva ohje) mukaan ja geotekninen mitoitus Eurocode 7 mukaan.
Euro 1-1 B	Eurocode-ohjejärjestelmän mukainen mitoistustapaus B, jolloin mitoituskuorma saadaan Eurocode 1, Osan 1 (yleiset suunnitteluperusteet) mukaan ja geotekninen mitoitus Eurocode 7 mukaan.
Euro 1-1 C	Eurocode-ohjejärjestelmän mukainen mitoistustapaus C, jolloin mitoituskuorma saadaan Eurocode 1, Osan 1 (yleiset suunnitteluperusteet) mukaan ja geotekninen mitoitus Eurocode 7 mukaan.
Euro 1-1 NAD B	Eurocode-ohjejärjestelmän mukainen mitoistustapaus B, jolloin mitoituskuorma saadaan Eurocode 1, Osan 1 (yleiset suunnitteluperusteet) ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan sekä geotekninen mitoitus Eurocode 7 ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

**Euro 1-1 NAD C** Eurocode-ohjejärjestelmän mukainen mitoitus tapaus C, jolloin mitoituskuorma saadaan Eurocode 1, Osan 1 (yleiset suunnitteluperusteet) ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan sekä geotekninen mitoitus Eurocode 7 ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan.

Eurocode 7 mukaan ei lasketa tapauksen A mukaista mitoitusta, koska kysymyksessä ei ole nosteongelma. Eurocode 1 mukaan tapaus A tarkistetaan, jos kysymyksessä on jäykän perustuksen stabiliteettiongelma.

## 6.2 MAANVARAISET PERUSTUKSET

Liitteiden 1-2 laskentaesimerkit 1-2 käsittelevät maanvaraisen perustuksen geoteknistä mitoitusta. Laskentaesimerkkien lähtötiedot on saatu tielaitoksen julkaisusta Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa.

### 6.2.1 Laskentaesimerkki 1

Liitteen 1 laskentaesimerkki 1 käsittelee maanvaraisen perustuksen geoteknistä mitoitusta. Kantavuuskaavalla lasketaan perustuksen kantokyky ja sitä verrataan mitoituskuorman aiheuttamaan perustuksen pohjapaineeseen ohjejärjestelmittäin. Eurocode 7 liitteessä B esitetty kantavuuskaava kitkamaalle on sama kuin tielaitoksen julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa antama kantavuuskaava. Molempien julkaisujen kantavuuskaavat perustuvat DIN normin kantavuuskaavaan.

Jokaiselle mitoitus tapaukselle lasketaan perustuksen pohjapaineen mitoitusarvo. Perustuksen ominaiskuormat sekä perustuksen koko ovat vakioita kaikille mitoitus tapauksille. Tulosten erot johtuvat ainoastaan kuormien yhdistelyperiaatteiden sekä kitkakulman mitoitusarvojen eroista.

Kunkin ohjejärjestelmän mitoituskuorma lasketaan luvun 3 perusteella. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan mitoituskuorman laskenta sekä määräävän kuormayhdistelmän etsintä on työläs tehtävä: pysyvä kuorma kerrotaan edullisen tai epäedullisen kuorman osavarmuusluvulla, määräävä muuttuva kuorma muuttuvan kuorman osavarmuusluvulla sekä muut muuttuvat kuormat muuttuvan kuorman osavarmuusluvulla sekä yhdistelmäarvon kertoimella. Liitteen 1 taulukoiden 1 ja 2 määräävät muuttuvat kuormat on etsitty kokeilemalla. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan kokeiltavia tapauksia on huomattavasti enemmän kuin tielaitoksen ohjeisiin perustuvalla menetelmällä.

Kantavuuskaavassa käytetään kitkakulman mitoitusarvoa. Tielaitoksen ohjeen mukaan kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,25. Eurocode 7 ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan tapauksen B osavarmuusluku on 1,0 ja tapauksen C osavarmuusluku on 1,25 kitkakulman tangentille.

Ohjejärjestelmien antamaa suhteellista varmuutta verrattuna vaadittuun varmuustasoon kutsutaan mitoitusvarmuusluvuksi. Mitä suuremman arvon mi-

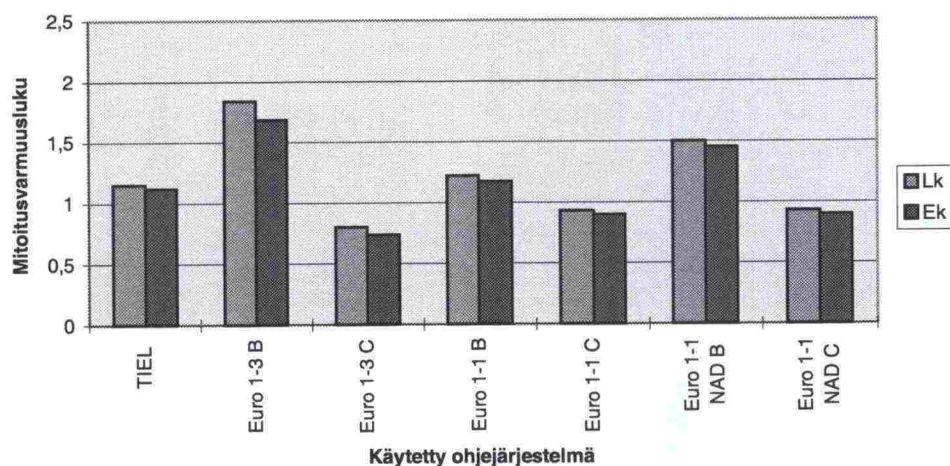


toitusvarmuusluku saa, sen taloudellisemman mitoituksen ohjejärjestelmä antaa. Laskentaesimerkissä 1 mitoitusvarmuusluku on perustuksen kantokyvyn ja pohjapaineen suhde.

Kuvassa 6.1 (liite 1, s. 70) on esitetty laskentaesimerkin 1 antamat tulokset. Kuvan perusteella eurocodien määräävän mitoituksen antaa tapaus C. Kuvan lyhenteet Lk ja Ek tarkoittavat sitä, että vaihtoehtoinen liikennekuorma on tielaitoksen liikennekuormakaavion 1 antama liikennekuorma tai raskas erikoiskuorma.

Tulosten perusteella taloudellisimman mitoituksen antaa tielaitoksen mitoitus. Tielaitoksen määräävä mitoitus TIEL Ek antaa mitoitusvarmuusluvun 1,12. Eurocodien määräävän mitoituksen antaa tapaus Euro 1-3 C Ek. Se antaa mitoitusvarmuusluvun 0,74.

Kuvan 6.1 perusteella kaikki mitoitusvarmuusluvut antavat aika alhaisia arvoja, mutta tulee muistaa, että ohjejärjestelmien mukaiset varmuudet sisältyvät mitoitusvarmuuslukuihin sekä kantavuuskaavan sisäinen varmuus on noin kaksi /8/.



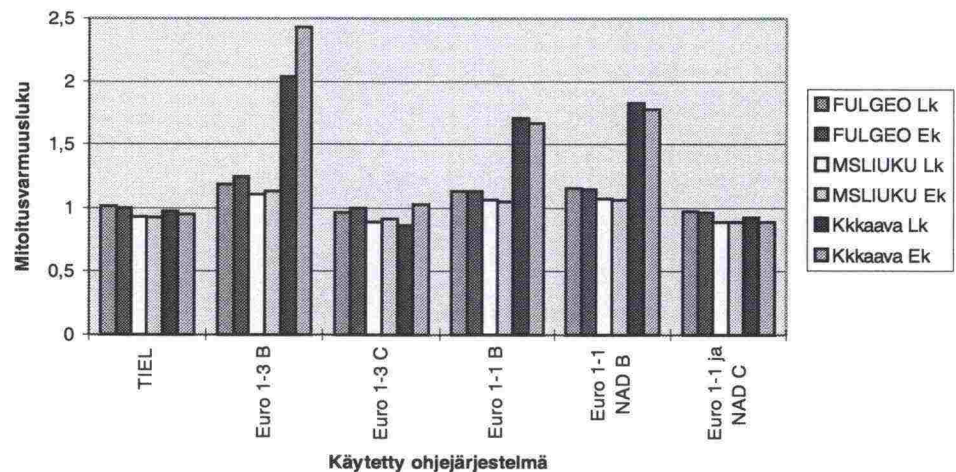
Kuva 6.1. Laskentaesimerkin 1 tulokset (liite 1, s. 70).

## 6.2.2 Laskentaesimerkki 2

Liitteen 2 laskentaesimerkki 2 käsittelee luiskanvaraisen perustuksen vakavuus- ja kantavuuslaskentaa. Laskentaesimerkissä perustuksen vakavuus lasketaan FULGEO- ja MSILUKU-ohjelmilla. Lisäksi lasketaan perustuksen kantokyky tielaitoksen kaltevan maan kantavuuskaavalla.

Laskentaesimerkin mitoituskuormat sekä kitkakulman mitoitusarvo on laskettu luvun 3 mukaan. Käytetyt mitoitusapaukset sekä ohjejärjestelmät on esitelty kohdassa 6.1.

Laskentaesimerkin tulokset on esitetty kuvassa 6.2 (liite 2, s. 80). Laskentaesimerkin mitoitusapaukset Euro 1-1 C ja Euro 1-1 NAD C on yhdistetty, koska ne antavat saman tuloksen. Laskentaesimerkissä 1 ei näin voitu tehdä, koska perustukseen kohdistui tuulikuorma. Kuvan perusteella eurocodien määräävä mitoitusapaus on jälleen C. Tielaitoksen mitoitusapaus antaa jälleen taloudellisimman mitoituksen, kun mitoitusvarmuusluvun laskenta perustuu liukupinta-analyyseihin. Kuvan 6.2 perusteella kaikkien määrävien mitoituksien antamat tulokset ovat hyvin lähellä toisiaa.



Kuva 6.2. Laskentaesimerkin 2 tulokset (liite 2, s. 80).

Kuvan 6.2 eurocodien mukaiset kaltevan maan kantavuuskaavaan perustuvat mitoitusapaukset B antavat huomattavasti suurempia mitoitusvarmuuslukuja kuin liukupinta-analyyseihin perustuvat tapaukset B. Kantavuuskaavan murtopinta perustuu logaritmiseen spiraaliin /8/. Logaritmissen spiraalin muodosta johtuu, että suurilla kitkakulman arvoilla kantavuuskaava antaa liian korkeita arvoja kantokyvyille. Alhaisilla kitkakulman arvoilla kantavuuskaava antaa luotettavia arvoja perustuksen kantokyvyille. Kitkakulman tangentin osavarmuusluku eurocodien mitoitusapaukselle B on 1,0, jolloin kitkakulman mitoitusarvona käytetään kitkakulman ominaisarvoa, joka on laskentaesimerkissä 38°.

### 6.2.3 Johtopäätökset

Laskentaesimerkkien perusteella maanvaraiselle perustukselle eurocodien mukaisen määrävien mitoituksen antaa tapaus C. Tielaitoksen mitoitusmenetelmä antaa taloudellisimman mitoituksen.

## 6.3 PAALUPERUSTUKSET

Liitteiden 3-7 laskentaesimerkit 3-7 käsittelevät paaluperustusten geoteknistä mitoitusta. Laskentaesimerkkien tiedot on saatu todellisista kohteista. Maaperätietoja sekä paalujen kuormia on saatettu yksinkertaistaa.



Paalujen geoteknisen murtokuorman laskenta perustuu staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuviin menetelmiin sekä dynaamisiin paalutuskavoihin.

Laskentaesimerkkien 3-6 paalut on dynaamisesti koekuormitettu. Koekuormitusten perusteella lasketaan myös paalujen kantavuuden mitoitusarvo. Tulee kuitenkin muistaa, että dynaamisten koekuormitusten tavoitteena ei usein ole saavuttaa paalun todellista murtokuormaa, vaan osoittaa, että paalun murtokuorma ylittää sille suunnitellun kuorman tietyllä varmuudella. Lisäksi on otettava huomioon, että dynaamisessa koekuormituksessa paalun todellinen murtokuorma ei välttämättä mobilisoidu kokonaisuudessaan. Syynä tähän voi olla esimerkiksi lyöntikaluston tehottomuus tai paaluputken riittämätön jäykkyys iskuaallon välittämiseen.

Kun lasketaan laskentaesimerkkien 3-6 paalujen murtokuormia dynaamisilla paalutuskavoilla, käytetään dynaamisten koekuormitusten antamaa paaluihin siirtynyttä todellista energiaa erilaisten tehokkuuskertoimien, järkäleen painon sekä lyöntikorkeuden tulon tilalla.

Laskentaesimerkkien tulokset on esitetty kahdessa kuvassa esimerkeittäin. Toisessa kuvassa esitetään maan lujuusparametreihin perustuvien menetelmien antamat tulokset ja toisessa paalun lyöntienergiaan perustuvien menetelmien antamat tulokset.

### 6.3.1 Laskentaesimerkki 3

Liitteen 3 laskentaesimerkin 3 Ristonmaan risteys sillan tuki G on perustettu suljetuilla teräsputkipaaluilla.

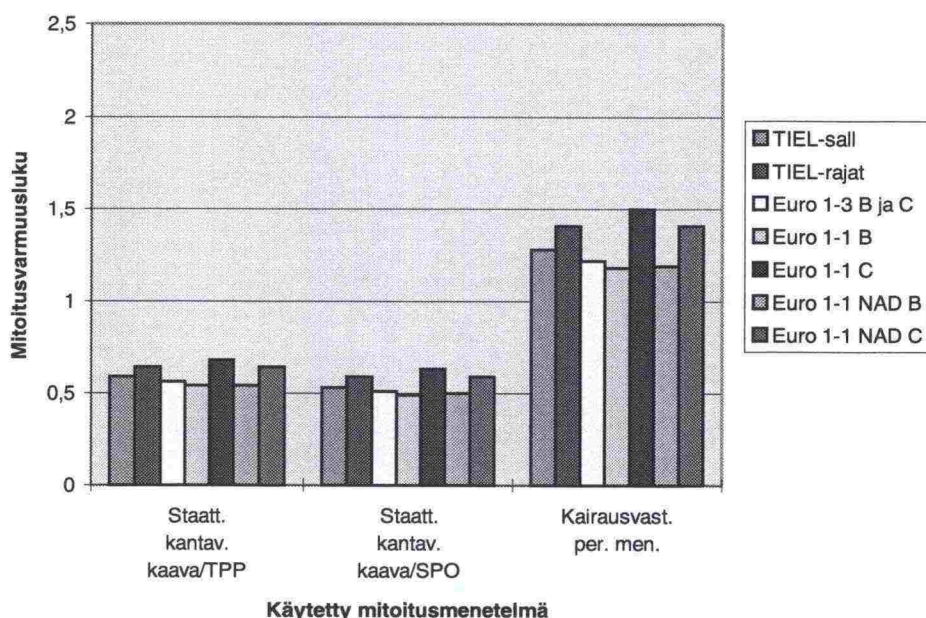
Suljetun teräsputkipaalun murtokuorma on laskettu staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen sekä dynaamisiin paalutuskavoihin perustuvilla menetelmillä. Lisäksi paalun murtokuorma on saatu koekuormitusraporteista. Eri ohjejärjestelmien perusteella on laskettu paalun mitoituskuorma sekä geotekninen kantavuus. Geoteknisen kantavuuden ja mitoituskuorman suhdetta kutsutaan mitoitusvarmuusluvuksi.

Tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmällä paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun murtokuorma kokonaisvarmuusluvulla. Kokonaisvarmuusluku on 2,5-3,0 staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen sekä dynaamisiin paalutuskavoihin perustuvilla menetelmillä ja 2,0 dynaamisiin koekuormituksiin perustuvalla menetelmällä.

Tielaitoksen sekä eurocodien rajatilamenetelmällä paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla, joka on 1,3 lyöntipaalulle. Paalun kantavuuden ominaisarvo saadaan jakamalla paalun murtokuorma kertoimella  $\xi$ . Kertoimen arvo riippuu mitoitusmenetelmästä sekä käytetystä ohjejärjestelmästä. Kohdassa 3.4 on esitetty lukuarvot  $\xi$ -kertoimelle.



Laskentaesimerkin tulokset on esitetty kuvissa 6.3 (liite 3, s. 95) ja 6.4 (liite 3, s. 96). Kuvassa 6.3 on tulokset, jotka perustuvat staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuviin mitoitusmenetelmiin.

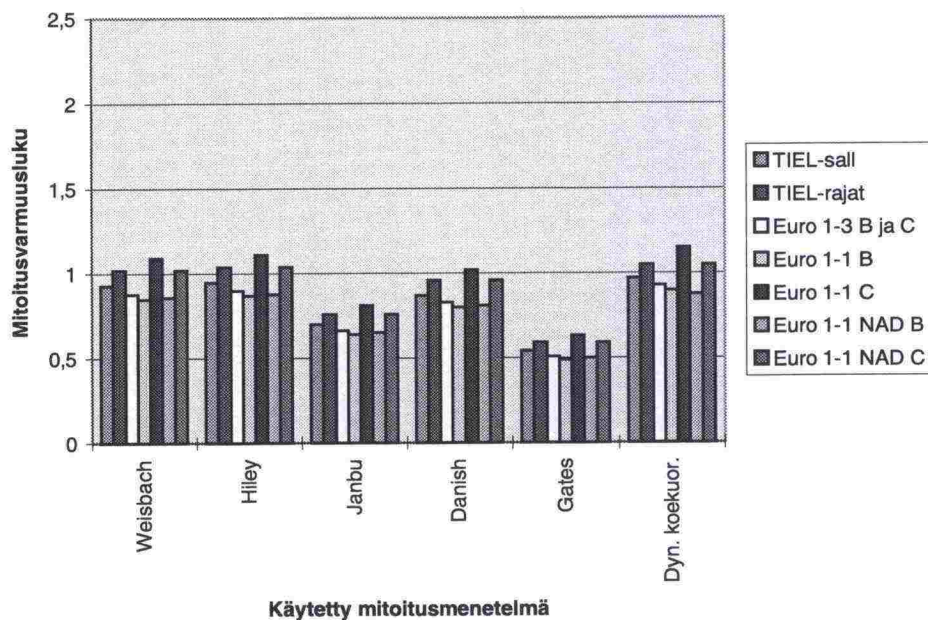


Kuva 6.3. Laskentaesimerkin 3 tulokset staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä (liite 3, s. 95).

Staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamat murtokuormat on laskettu julkaisujen Teräspalkkipaalut sekä Suurpaalutusohje mukaan. Kairausvastukseen perustuva menetelmä antaa saman murtokuorman molempien ohjeiden mukaan, jolloin tulokset on esitetty samassa kuvaajassa. Staattiseen kantavuuskaavaan perustuvat menetelmät antavat eri tulokset paalun murtokuormalle. Suurpaalutusohje antaa vaippakantavuudelle pienemmän arvon kuin julkaisu Teräspalkkipaalut. Kärkikantavuuden arvo on sama molempien julkaisujen perusteella.

Kuvan 6.3 perusteella staattiseen kantavuuskaavaan perustuvilla menetelmillä saavutetaan vain noin puolet kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamasta kantavuudesta. Kantavuuden alhainen arvo johtuu siitä, että laskuissa on otettu huomioon julkaisun Teräspalkkipaalut antama rajoitus, jonka mukaan kitkakulman  $> 40^\circ$  käyttöä ei suositella, ellei kitkakulman arvoa ole varmistettu laboratorio- tai in-situ kokeilla.

Kuvassa 6.4 on esitetty dynaamisten paalutuskaavojen ja koekuormitusten antamat mitoitusvarmuusluvut ohjejärjestelmittäin.



Kuva 6.4. Laskentaesimerkin 3 tulokset dynaamisiin paalutuskavaoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvilla menetelmillä (liite 3, s. 96).

Kuvien 6.3 ja 6.4 perusteella voidaan todeta, että eurocodien mukaiset määräävät mitoitus antaa tapaus B. Tapaus B on määräävä, koska paalujen kantavuuden laskennassa materiaalipuolella tapauksia B ja C ei ole eroteltu ja kuormapuolella tapauksen B antamat osavarmuusluvut ovat suuremmat. Itse asiassa Eurocode 7 luvussa 7 Paaluperustukset ei edes mainita tapauksia B ja C, annetaan vain yhdet osavarmuusluvut. Tämä saa suunnittelijan hieman ymmälleen, siitä miten pitäisi toimia.

Mitoitustapaukset Euro 1-3 B ja Euro 1-3 C on yhdistetty, koska ne antavat saman tuloksen. Kuormapuolella Eurocode 1, Osan 3 mukaan tapaukset B ja C on yhdistetty ja Eurocode 7 antaa materiaalipuolella vain yhdet osavarmuusluvut. Suunnittelijan mielessä käy, miksei näin voisi mitoitus käydä myös muiden eurocodien mukaan. Näin yksi turha laskentakierros jäisi pois.

Kuvan 6.4 perusteella dynaamisilla koekuormituksilla on saatu alhaisia arvoja paalun kantavuudelle. Tässä tapauksessa yhden koekuormitettavan paalun yläpää tyssäytyi, eikä koekuormituksia voitu jatkaa. Todennäköisesti paalun murtokuorma ei mobilisoitunut kokonaan.

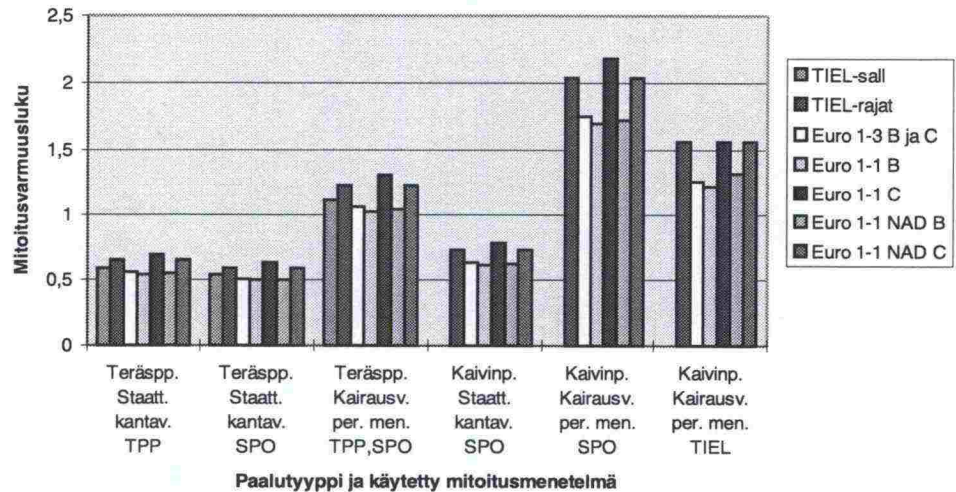
### 6.3.2 Laskentaesimerkki 4

Liitteen 4 laskentaesimerkin 4 Kutujoen sillan tuki 2 on perustettu suljetuilla teräsputkipaaluilla. Vertailun vuoksi laskettiin myös geotekninen mitoitus kaivinpaaluvaihtoehdolle.

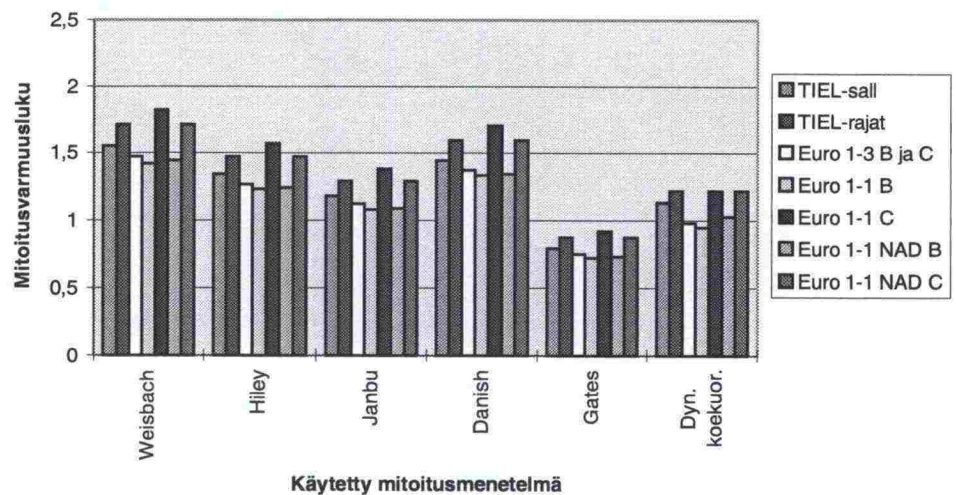
Laskentaesimerkin tulokset on esitetty kuvissa 6.5 (liite 4, s. 113) ja 6.6 (liite 4, s. 114). Kuvassa 6.5 on esitetty tulokset teräsputki- ja kaivinpaalulle, jotka



perustuvat staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuviin menetelmiin. Kuvassa 6.6 on esitetty tulokset teräsputkipaalulle, jotka perustuvat dynaamisiin paalutuskaavoihin ja koekuormituksiin.



Kuva 6.5. Laskentaesimerkin 4 tulokset staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä suljetulle teräsputkipaalulle ( $d = 813$  mm) ja kaivinpaalulle ( $d = 1200$  mm) (liite 4, s. 113).



Kuva 6.6. Laskentaesimerkin 4 tulokset dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvilla menetelmillä suljetulle teräsputkipaalulle (liite 4, s. 114).

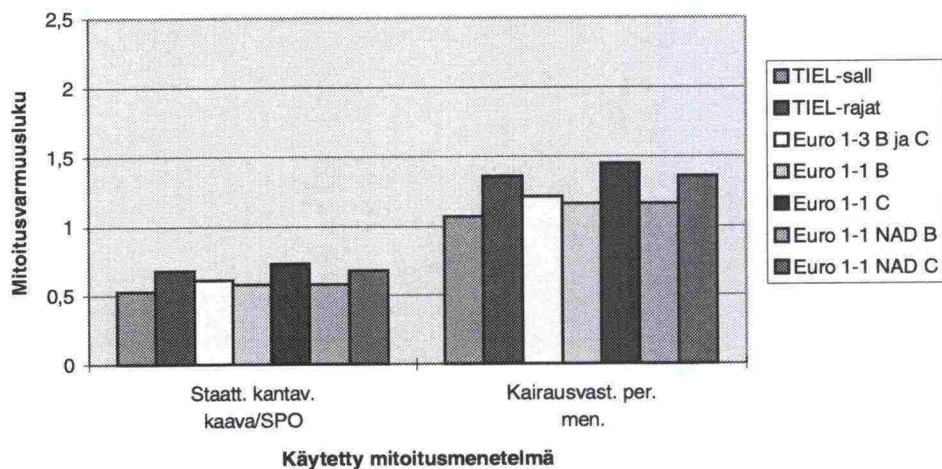
### 6.3.3 Laskentaesimerkki 5

Liitteen 5 laskentaesimerkin 5 Mikonkorven risteys sillan tuki 1 on perustettu sipulipaaluilla.

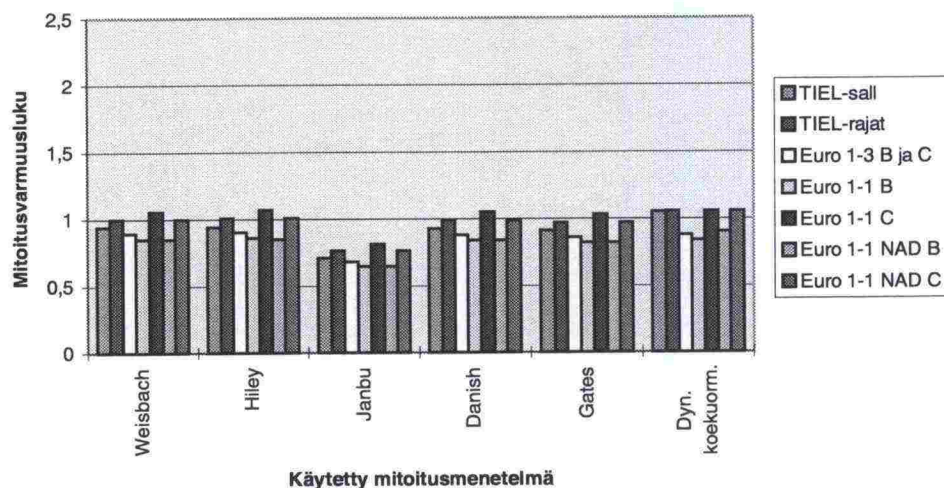
Laskentaesimerkin tulokset on esitetty kuvissa 6.7 (liite 5, s. 126) ja 6.8 (liite 5, s. 127). Kuvassa 6.7 on esitetty tulokset, jotka perustuvat staattiseen kan-



tavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuviin menetelmiin. Kuvassa 6.8 on esitetty tulokset, jotka perustuvat dynaamisiin paalutuskavaoihin ja koekuorimituksiin.



Kuva 6.7. Laskentaesimerkin 5 tulokset staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä (liite 5, s. 126).



Kuva 6.8. Laskentaesimerkin 5 tulokset dynaamisiin paalutuskavaoihin ja dynaamisiin koekuorimituksiin perustuvilla menetelmillä (liite 5, s. 127).

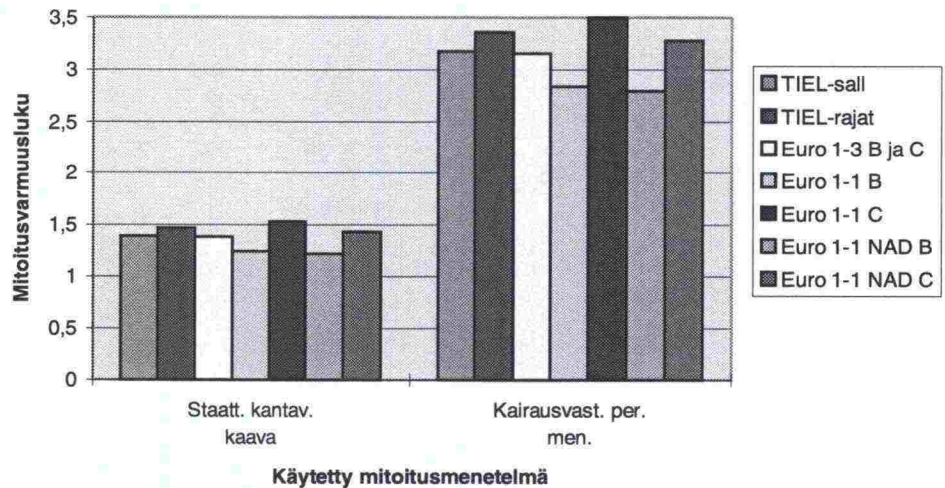
### 6.3.4 Laskentaesimerkki 6

Liitteen 6 laskentaesimerkin 6 Ounasjoen sillan tuki 4 on perustettu Franki-putkipaaluryhmällä.

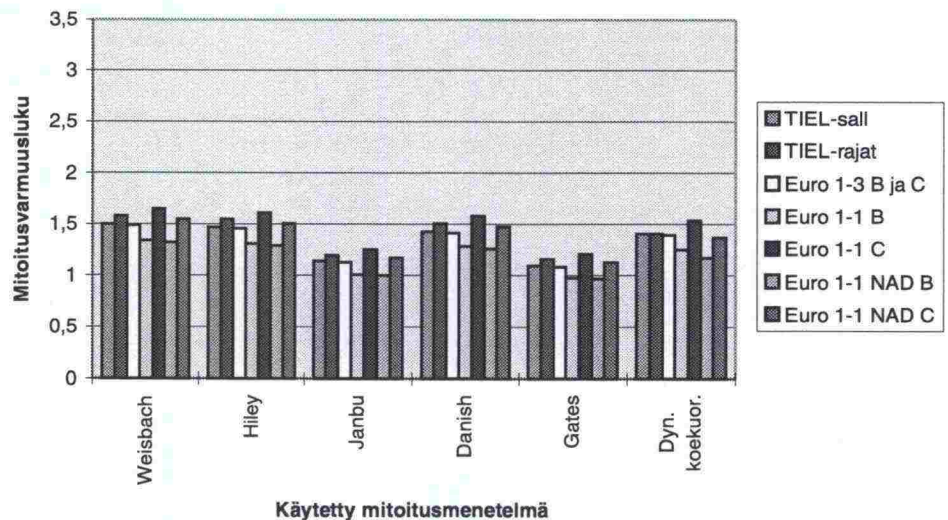
Käsinlaskentamenetelmällä on laskettu perustuksen kuormien jakautuminen paaluille. Laskentaesimerkissä on laskettu yksittäisen paalun geotekninen kantavuus. Paaluryhmän vaikutusta kantavuuteen ei ole otettu huomioon.

Mitoitusvarmuusluku saadaan, kun paalun geoteknisen kantavuuden mitoitussarvo jaetaan mitoituskuormalla.

Laskentaesimerkin tulokset on esitetty kuvissa 6.9 (liite 6, s. 144) ja 6.10 (liite 6, s. 144).



Kuva 6.9. Laskentaesimerkin 6 tulokset staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä (liite 6, s. 144).



Kuva 6.10 Laskentaesimerkin 6 tulokset dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvilla menetelmillä (liite 6, s. 144).

Kun verrataan Franki-putkipaalun kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamaa mitoitusvarmuuslukua dynaamisten koekuormitusten antamaan mitoitusvarmuuslukuun, huomataan, että dynaamisilla koekuormituksilla saavutetaan vain noin puolet kantavuudesta, joka saadaan kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä. Tulee kuitenkin muistaa, että kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä lasketaan vain paalun geotekninen kantavuus. Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus ei kuitenkaan ole mitoituksen määräävä

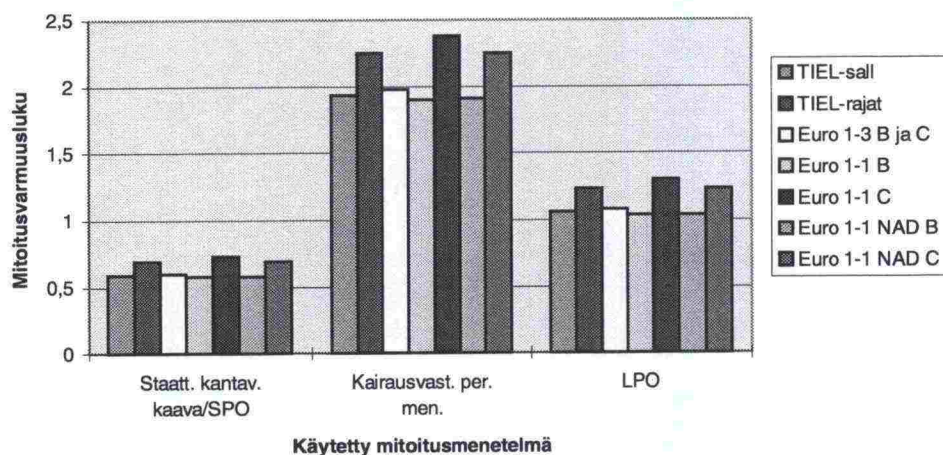


tekijä. Paalun kantavuuden mitoittaa todellisuudessa Franki-putkipaalun varren rakenteellinen kantavuus. Franki- ja sipulipaalun mitoituksessa tulisi ottaa huomioon, että määrävän mitoituksen antaa yleensä paalun rakenteellinen kantavuus.

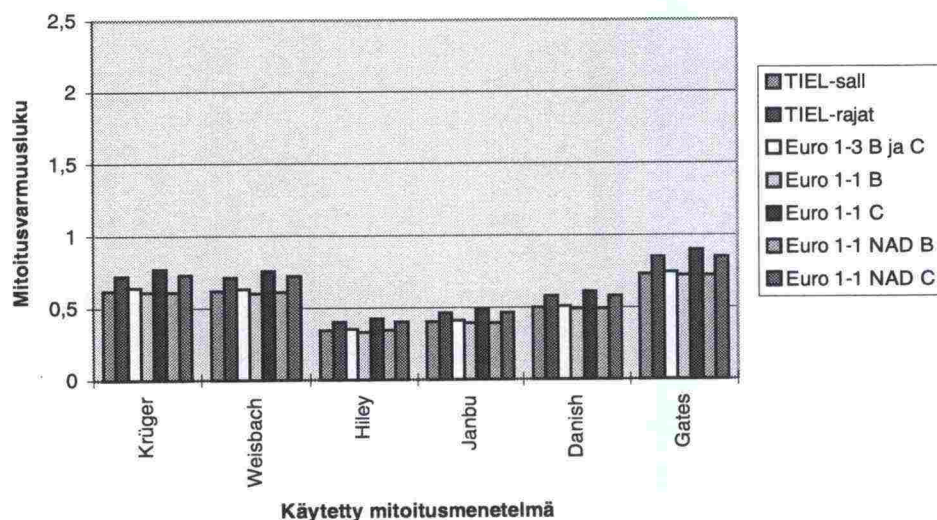
### 6.3.5 Laskentaesimerkki 7

Liitteen 7 laskentaesimerkin 7 Aurajokilaakson sillan tuki 1 on perustettu teräsbetonipaaluryhmällä.

Laskentaesimerkin tulokset on esitetty kuvissa 6.11 (liite 7, s. 158) ja 6.12 (liite 7, s. 159).



Kuva 6.11. Laskentaesimerkin 7 tulokset, kun paalun murtokuorma on laskettu staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä sekä Lyöntipaalutusohjeen mukaan (liite 7, s. 158).



Kuva 6.12. Laskentaesimerkin 7 tulokset, kun paalun murtokuorma on laskettu dynaamisilla paalutuskäyriä (liite 7, s. 159).



Tielaitoksen Avaruuspaalutusohjelmalla on laskettu perustuksen kuormien jakautuminen paaluille. Laskentaesimerkissä on laskettu yksittäisen paalun geotekninen kantavuus, jota verrataan paalun mitoituskuormaan.

Kuvien 6.11 ja 6.12 perusteella paalun kantavuudelle saadaan suuri hajonta. Perustuksen paaluja ei ole koekuormitettu. Dynaamisten paalutuskäyrien antamat tulokset on laskettu paalutuspöytäkirjojen avulla.

### 6.3.6 Johtopäätökset

Laskentaesimerkkien perusteella paaluperustukselle eurocodien mukaisen määräävän mitoituksen antaa tapaus B. Tielaitoksen rajatilamenetelmä antaa taloudellisimman mitoituksen. Tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmä antaa hyvin samanlaisia arvoja kuin eurocodien määräävät mitoitusapaukset B. Jos paaluperustukseen kohdistuu vain yksi muuttuva kuorma mitoitusapaukset TIEL-rajat ja Euro 1-1 NAD C antavat aivan saman tuloksen.

Kun verrataan paaluperustusten laskentaesimerkkien kuvia 6.3-6.12 toisiinsa, huomataan, että laskentamenetelmä vaikuttaa huomattavasti enemmän laskennan lopputulokseen kuin valittu ohjejärjestelmä. Staattiseen kantavuuskaavaan perustuvalla menetelmällä saavutetaan noin puolet kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamasta kantavuudesta. Kaikissa staattiseen kantavuuskaavaan perustuvissa mitoituksissa on huomioitu julkaisun Teräspalkkipaalut rajoitus  $< 40^\circ$  kitkakulman arvoille. Kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä saadaan vähän korkeampia paalun kantavuuksia kuin dynaamisten koekuormitusten perusteella. Dynaamisten koekuormitusten todellinen murto-kuorma ei välttämättä kuitenkaan ole mobilisoitunut ja toisaalta kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä lasketaan vain paalun geotekninen kantavuus.

Dynaamisista paalutuskäyriä Weisbach'n, Hiley'n ja Danish antavat hyvin samanlaisia tuloksia laskentaesimerkeille 3-6. Niiden antamat arvot ovat hyvin lähellä dynaamisten koekuormitusten antamia arvoja. Paalutuskäyriä käytettiin dynaamisten koekuormitusten antamaa paaluun siirtynyttä todellista energiaa erilaisten tehokkuuskertoimien, järkäleen painon sekä pudotuskorkeuden tulon tilalla. Laskentaesimerkin 7 paaluja ei ole koekuormitettu. Paalutuskäyrien laskelmat perustuvat paalutuspöytäkirjojen tietoihin. Kuvan 6.12 perusteella paalutuskäyriä antavat alhaisia arvoja mitoitusvarmuusluville.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Verrattaessa tielaitoksen ohjeiden mukaista maanvaraisten ja paaluperustusten geoteknistä mitoitusta eurocode-ohjejärjestelmän mukaiseen mitoitukseen voidaan todeta, että eurocode-ohjejärjestelmää on hankala käyttää sen raskaan esitystavan ja laajuuden vuoksi. Yleiset suunnitteluperusteet ja kuormien osavarmuusluvut on esitetty Eurocode 1, Osassa 1 ja geoteknisessä mitoituksessa käytettävät materiaaliparametrien osavarmuusluvut Eurocode 7. Eurocode 1 muissa osissa on esitetty mm. tuuli-, lumi- ja hyötykuormien ominaisarvot. Suunnittelijan kannalta mitoituksessa tarvittava tieto on jaettu liian useaan esistandardiin. Suunnittelija joutuu lukemaan satoja sivuja ohjejärjestelmän tekstiä, ennen kuin yksinkertaisinkaan geotekninen mitoitus onnistuu.

Eurocode-ohjejärjestelmän sekavuutta lisää, että Eurocode 1, Osan 1 mukaan mitoitusilanteita on useita. Sekä käyttö- että murtorajatilassa mitoitusilanteita on kolme. Käyttörajan mitoitusilanteet ovat pysyvä, palautuva sekä pitkäaikainen tilanne. Murtorajan mitoitusilanteet ovat pitkäaikainen ja tilapäinen tilanne, onnettomuus- sekä maanjäristystilanne. Perustuksen kantokyky ja paalun kantavuus lasketaan murtorajan pitkäaikaisen ja tilapäisen tilanteen mukaan. Eurocode 1, Osan 1 mukaan murtorajan pitkäaikainen ja tilapäinen tilanne on vielä jaettu kolmeen eri mitoitusapaukseen. Näitä mitoitusapauksia kutsutaan tapauksiksi A, B ja C. Kuormien ja materiaalien osavarmuusluvut valitaan mitoitusapauksen A, B tai C mukaan. Eurocode 1 mukaan tapauksen A osavarmuuslukuja käytetään, kun tarkastellaan rakenteen staattisen tasapainon meneteystä. Rakenteen kestävyys ollessa kyseessä käytetään tapauksen B osavarmuuslukuja. Tapauksen C osavarmuuslukuja käytetään, kun tarkastellaan maapohjan murtumista. Ohjejärjestelmän mukaan rakenteen mitoitus tulee tarkistaa kaikilla kolmella tapauksella. Tämä lisää suunnittelijan työmäärää. Suunnittelijalle jää epäselväksi tuleeko esimerkiksi geoteknisessä mitoituksessa laskea kaikki tapaukset vai riittääkö tapauksen C mukainen mitoitus. Laskentaesimerkkien maanvaraisten ja paaluperustusten geotekninen mitoitus on tehty tapauksien B ja C mukaan.

Eurocode 7 mukaan tapauksen A mukaista mitoitusta ei tarvitse kuitenkaan tarkastaa, ellei kyseessä ole nosteongelma. Eurocode 1, Osan 3: Siltojen liikennekuormat mukaan mitoituskuorman laskenta poikkeaa yleisestä menettelystä. Mitoitusapaukset B ja C on yhdistetty kuormapuolella yhdeksi mitoitusapaukseksi. Määräävän kuormayhdistelmän etsintä on nopeampaa kuin yleisen menettelyn mukaan, koska useiden muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet saavat arvon nolla ja mitoitusapaukset B ja C on yhdistetty.

Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisissa mitoituksissa osavarmuusluvut ja kuormien yhdistelmäarvon kertoimet nousevat liian tärkeään asemaan. Kertoimien arvoja on hankala muistaa, ne pitää aina tarkastaa kyseistä esistandardista. Geoteknisessä suunnittelussa esistandardit määräävät hyvin tarkasti käytettävät varmuusluvut ja yhdistelykertoimet, mutta mitoitusmenetelmän valinta on toisarvoinen seikka. Laskentaesimerkkien 3-7 tulosten perusteella



mitoitusmenetelmän valinnalla on hyvin suuri merkitys mitoitustulosten hajontaan. Geotekniseen suunnitteluun liittyvien esistandardien ja ainakin kansallisten soveltamisasiakirjojen pitäisi siirtyä mielummin käyttämään menetelmäkohdaisia osavarmuyslukuja kuin samoja osavarmuyslukuja kaikille mitoitusmenetelmille. Menetelmäkohtaisten varmuuslukujen määrittäminen olisi hyvä jatkotutkimusaihe.

Eurocode 7 liitteessä B esitetty maanvaraisen perustuksen kantavuuskaava kitkamaalle on sama kuin tielaitoksen julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa antama kitkamaan kantavuuskaava. Laskentaesimerkkien 1 ja 2 perusteella eurocode-mitoituksista maanvaraisen perustuksen kantokyvyn laskennassa määräävä mitoitustapaus on aina tapaus C. Mitoitustapauksen C antama kitkakulman tangentin osavarmuysluku on sama kuin tielaitoksen ohjeen antama osavarmuysluku. Tulosten erot johtuvat mitoituskuorman erilaisista laskentaperiaatteista. Tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmä antaa taloudellisemman mitoituksen kuin eurocodien määräävät tapaukset C.

Laskentaesimerkissä 2 on laskettu luiskanvaraisen perustuksen vakavuus liukupinta-analyyseillä ja kantavuuskaavalla. Laskentaesimerkin perusteella taloudellisimman mitoituksen antaa liukupinta-analyysi FULGEO-ohjelmalla. Tielaitoksen kaltevan maan kantavuuskaava antaa mitoitusvarmuusluville alhaisimmat arvot. Kaava antaisi oikeammat arvot, jos pienennyskertoimen arvoa muutettaisiin. Kaltevan maan kantavuuskaavaa käytetään kuitenkin alustavissa mitoituksissa, joten sen pitää mielummin antaa varmalla kuin epävarmalla puolella olevia mitoituksia.

Paalujen geoteknisen kantavuuden mitoitusarvon laskenta Suurpaalutusohjeen mukaan noudattelee eurocodien antamia laskentaperiaatteita. Suurpaalutusohje RIL 212-1995 on tehty välivaiheen ohjeeksi, joka pyrkii sovittamaan kotimaisen mitoituskäytännön eurooppalaisiin vaatimuksiin. Perinteiseen kokonaisvarmuusmenetelmään tai sallittujen jännitysten menetelmään verrattuna menetelmä on selvästi hankalampi. Ohjeiden mukaan paalun geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo saadaan jakamalla paalun murtokuorma ensin  $\xi$ -kertoimella ja sen jälkeen osavarmuusluvulla.  $\xi$ -kertoimen arvo riippuu käytetystä mitoitusmenetelmästä ja ohjejärjestelmästä. Osavarmuusluvun arvo riippuu paalutyypistä.

Laskentaesimerkkien 3-7 perusteella eurocode-ohjejärjestelmän mitoitustapaus B antaa aina määräävän mitoituksen paaluille. Mitoitustapauksen B antamat tulokset ovat hyvin lähellä tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmän antamia tuloksia. Sen sijaan tielaitoksen rajatilamitoitus, joka perustuu Suurpaalutusohjeeseen, antaa saman suuruisia tuloksia kuin eurocode-ohjejärjestelmän tapauksen C mukaiset mitoitukset. Määräävistä mitoitustapauksista tielaitoksen rajatilamitoitus antaa taloudellisimman mitoituksen. Laskentaesimerkkien tulosten perusteella voidaan todeta, että eurocode-ohjejärjestelmä antaisi taloudellisempia mitoituksia paaluperustuksille, jos mitoitus tehtäisiin tapauksen C, maapohjan murtuminen mukaan.



Laskentaesimerkeissä 3-7 paalujen murtokuorma laskettiin useilla eri menetelmillä. Murtokuorman arvot poikkesivat huomattavasti toisistaan. Kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä saatiin saman suuruisia tai suurempia tuloksia kuin dynaamisiin koekuormituksiin perustuvalla menetelmällä. Tulee kuitenkin muistaa, että kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä lasketaan vain paalun geotekninen kantavuus sekä dynaamisten koekuormitusten tavoitteena ei ole usein saavuttaa paalun todellista murtokuormaa, vaan osoittaa, että paalun murtokuorma ylittää sille suunnitellun kuorman tietyllä varmuudella. Lisäksi on otettava huomioon, että dynaamisessa koekuormituksessa paalun todellinen murtokurva ei välttämättä mobilisoidu kokonaan. Syynä tähän voi olla esimerkiksi lyöntikaluston tehottomuus tai paaluputken riittämätön jäykkyys iskuaallon välittämiseen.

Dynaamisista paalutuskäyttötapoista Weisbach'n, Hiley'n ja Danish paalutuskäytännöt antoivat hyvin samanlaisia tuloksia, ainakin kun paalutuskäytännöissä käytettiin dynaamisten koekuormitusten perusteella saatua paaluun siirtynyttä todellista energiaa erilaisten tehokkuuskertoimien, järkäleen painon sekä pudotuskorkeuden tulon tilalla. Liian varovaisia arvioita paalun murtokuormalle saatiin staattiseen kantavuuskäyttöön perustuvilla menetelmillä. Murtokuorman laskennassa otettiin huomioon julkaisun Teräspalkkipaalut rajoitus, jonka mukaan kitkakulman  $> 40^\circ$  käyttö mitoituksessa edellyttää laboratorio- tai in-situ kokeita. Jos staattiseen kantavuuskäyttöön perustuvalla menetelmällä lasketaan paalujen alustavaa kantavuutta, olisi ainakin kalliissa kohteissa järkevää tehdä tarkempia tutkimuksia, joilla selvitetään kitkakulman todellinen arvo. Rutinimitoituksissa ohje antaa alustavan murtokuorman paalulle riittävän tarkasti.

Eurocode-ohjejärjestelmän käyttäjälle yllätyksenä tulee, että maanvaraisten ja paaluperustusten geotekniset mitoitukset eroavat toisistaan. Jos ohjejärjestelmän mukaan perustusten geotekninen mitoitus tulee todella tarkastaa tapauksille B ja C, maanvaraisille perustuksille määräävän mitoituksen antaa tapaus C ja paaluperustuksille tapaus B.

Laskentaesimerkkien perusteella voidaan todeta, että eurocode-ohjejärjestelmään perustuvat geotekniset mitoitukset antavat epätaloudellisimpia mitoituksia kuin kansallisiin ohjeisiin perustuvat mitoitukset sekä eurocode-ohjejärjestelmän mukaan mitoituskuorman sekä kantavuuden mitoitusarvon laskenta on huomattavasti suuremman työn takana.

## 8 LÄHTEET

- /1/ Bowles, J. E. Foundation analysis and design. New York 1988, McGraw-Hill Publishing Company. 1004 s.
- /2/ Danish Geotechnical Institute. Bulletin No 22 Code of Practice for Foundation Engineering. Copenhagen 1966. Danish Geotechnical Institute. 22 s.
- /3/ Danish Geotechnical Institute. Bulletin No 32 Code of Practice for Foundation Engineering. Copenhagen 1978. Danish Geotechnical Institute. 52 s.
- /4/ Danish Geotechnical Institute. Bulletin No 36 Code of Practice for Foundation Engineering. Copenhagen 1985. Danish Geotechnical Institute. 53 s.
- /5/ ENV 1991-1:1994 Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 1: Basis of design. CEN, 1994. 85 s.
- /6/ ENV 1991-3:1995 Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 3: Traffic loads on bridges. CEN, 1995. 130 s.
- /7/ ENV 1997-1:1994 Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. CEN, 1994. 123 s.
- /8/ Hartikainen, J. & Heinonen, J. Geotechnical dimensioning of footings using partial safety coefficients. International Symposium on Limit state design in geotechnical engineering. Copenhagen 26.-28. May 1993. dgf-Bulletin 10 Vol 2/3 s. 501-512.
- /9/ Huuhtanen, J. Eurocode-ohjelma etenee kohti ratkaisuvaiheita. Asu ja rakenna. 2(1995)4 s. 11-15.
- /10/ Huuhtanen, J. Eurocodien koekäyttö alkaa Suomessa. Asu ja rakenna. (1994)4 s. 18-20.
- /11/ Ovesen, N. K. Eurocode 7 - A European Geotechnical Design Code. 4th International Conference on Piling and Deep Foundations. Stresa, Italy, 7.-12.4.1991
- /12/ Poulos, H. G. & Davis, E. H. Pile foundation analysis and design. Canada 1980. John Wiley & Sons. 397 s.

- /13/ Rantala, J, Hartikainen, J. & Zadroga, B. Bearing Capacity of Shallow Foundations on Horizontal and Sloping Noncohesive Ground. XII Nordiska Geoteknikermötet. Reykjavik 26.-28. Juni 1996. Vol 1 Artikler s. 61-68.
- /14/ Rantamäki, M. & Tamminne, M. Pohjarakennus. (viides painos) Helsinki 1990. Otatieto. ISBN 951-671-265-7. 228 s.
- /15/ SFS- ENV 1991-1 Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat Osa 1: Suunnitteluperusteet. SFS 1995. 88 s.
- /16/ SFS-ENV 1997-1:1994 Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu, Osa 1: Yleiset säännöt. 114 s.
- /17/ Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y. ja Rakentajain Kustannus Oy. Lyöntipaalausohjeet LPO-87. (kolmas painos) Vaasa 1991. Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y ja Rakentajain Kustannus Oy. ISBN 951-676-393-6. 135 s.
- /18/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. RIL 95, Pohjarakennus. Helsinki 1974. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. ISBN 951-758-003-7. 459 s.
- /19/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. RIL 121, Pohjarakennusohjeet 1988. Helsinki 1988. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. ISBN 951-758-178-5. ISSN 0356-9403. 92 s.
- /20/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. RIL 166, Pohjarakenteet. Helsinki 1986. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 597 s.
- /21/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. RIL 212-1995, Suurpaalausohje 1995, SPO 1995. Lahti 1995. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. ISBN 951-758-342-7. ISSN 0356-9403. 141 s.
- /22/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. RIL K138-1991. Euroopan yhdentymisen vaikutukset rakennusnormeihin. Helsinki 1991. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. ISBN 951-758-256-0. ISSN 0781-5344. 127 s.
- /23/ Tielaitos. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Helsinki 1991. Tielaitos. ISBN 951-47-2727-4. TIEL 2172068. 69 s.
- /24/ Tielaitos. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa Luku 10. Perustaminen paaluille, tarkistus. Helsinki 1996. Tielaitos. ISBN 951-726-278-7. TIEL 2170010. 16 s.



- /25/ Tielaitos. Siltojen kuormat. Helsinki 1991. Tielaitos. ISBN 951-47-2729-0. TIEL 2172072. 28 s.
- /26/ Tielaitos. Teräsputkipaalut. Helsinki 1993. Tielaitos. ISBN 951-47-6857-4. TIEL 2173448. 77 s.
- /27/ Ympäristöministeriö. Kansallinen soveltamisasiakirja esistandardille SFS- ENV 1991-1:1994 Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat Osa 1: Suunnitteluperusteet. Ympäristöministeriö, 1995. 10 s.
- /28/ Ympäristöministeriö. Kansallinen soveltamisasiakirja esistandardille SFS-ENV 1997-1:1994 Eurocode 7: Geotekninen suunnittelu, Osa 1: Yleiset säännöt. Ympäristöministeriö, 1996. 34 s.
- /29/ Zadroga, B. & Hartikainen, J. Bearing Capacity of Shallow Foundations on Slopes. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 42(1995)1-2. s. 53-67

## 9 LIITTEET

Liite 1. LASKENTAESIMERKKI 1. Maanvarainen sillan maatuki Kantokykykaavaan perustuva mitoitus	63
Liite 2. LASKENTAESIMERKKI 2. Penkereen varaan perustaminen Vakavuus- ja kantavuuslaskenta	71
Liite 3. LASKENTAESIMERKKI 3. Ristonmaan risteysilta Suljetut teräspuikipaalu, tuki G vasen paalu	82
Liite 4. LASKENTAESIMERKKI 4. Kutujoen silta Kaivin- ja teräspuikipaalu vaihtoehdot, tuki 2 paalu K4	97
Liite 5. LASKENTAESIMERKKI 5. Mikonkorven risteysilta Sipulipaalu, tuki 1, paalu 1	115
Liite 6. LASKENTAESIMERKKI 6. Ounasjoen silta Franki-puikipaalu ryhmä, tuki 4	128
Liite 7. LASKENTAESIMERKKI 7. Aurajokilaakson silta Teräsbetonipaalu ryhmä, tuki 1	145

## LASKENTAESIMERKKI 1. Maanvarainen sillan maatuki Kantokykykaavaan perustuva mitoitus

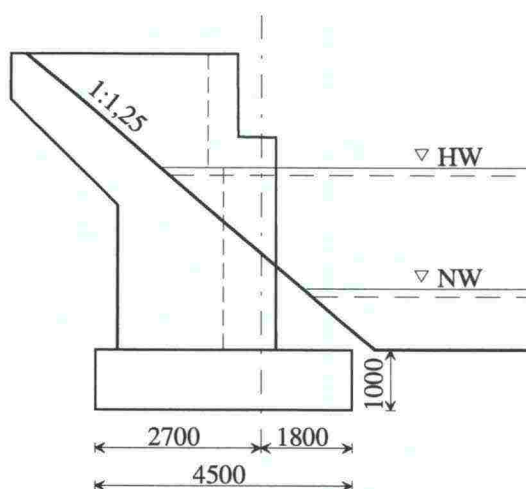
### 1 Käytettävät ohjejärjestelmät

Maanvaraisen sillan perustusten geotekninen kantavuus määritetään kansallisten ohjeiden ja eurocode-ohjejärjestelmän mukaan. Ohjejärjestelmien mukaisille mitoitusapauksille lasketaan kaksi kuormitustapausta, toisessa kuormitustapauksessa käytetään pystysuorana liikennekuormana tielaitoksen ohjeen Siltojen kuormat liikennekuormakaavion 1 mukaista kuormaa, toisessa ohjeen mukaista raskasta erikoiskuormaa.

Tielaitoksen ohjeiden mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä TIEL Lk1 ja TIEL Ek. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisia mitoituksia tehdään 12. Mitoituskuorma ja perustuksen geotekninen kantavuus lasketaan mitoitusapauksille B ja C. Mitoitusapauksille Euro 1-3 Lk B ja C sekä Euro 1-3 Ek B ja C käytetään kuormitusohjeina Eurocode 1, Osaa 1: Suunnitteluperusteet ja Osaa 3: Siltojen liikennekuormat. Geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7. Muut mitoitukset tehdään Eurocode 1, Osan 1 ja siihen liittyvän kansallisen soveltamisasiakirjan (NAD) perusteella. Eurocode 1, Osan 1 kuormitusohjeissa annetaan yleiset suunnitteluperusteet sekä kuormien yhdistelykertoimet rakennuksille. Geoteknisessä mitoituksessa käytetään Eurocode 7 ja siihen liittyvää kansallista soveltamisasiakirjaa. Mitoitusapauksista käytetään lyhenteitä Euro 1-1 Lk B ja C, Euro 1-1 Ek B ja C, Euro 1-1 NAD Lk B ja C sekä Euro 1-1 NAD Ek B ja C.

### 2 Perustuksen mitat

Perustuksen mitat on esitetty kuvassa 1.



MAATUEN LEVEYS 9,0 m

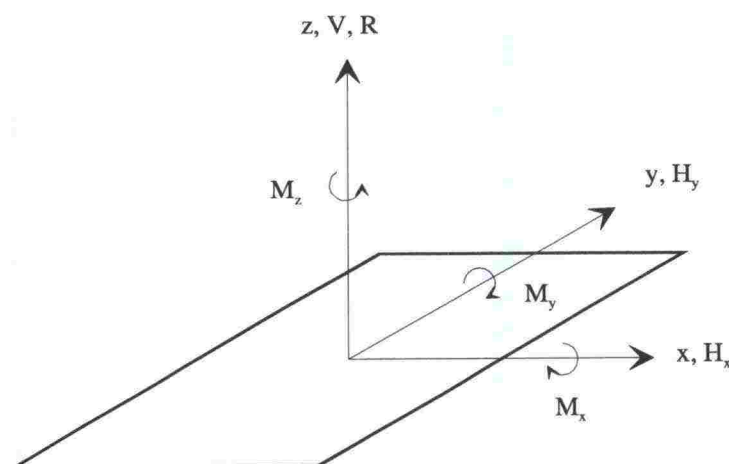
PERUSLAATTA  $B \times L = 4,5 \text{ m} \times 10,0 \text{ m}$

PERUSMAA TIIVIS HIEKKA,  $\phi = 36^\circ$

Kuva 1. Perustuksen mitat.



Maatuki sijoitetaan koordinaatistoon, jonka origo sijaitsee laakerilinjalla peruslaatan alapinnan tasossa. X-akseli on laatan lyhyemmän sivun B suuntainen. Akselien ja voimasuureiden positiiviset suunnat ovat oheisen kuvan 2 mukaiset. Kaikissa laskentaesimerkeissä käytetään kuvan 2 mukaista laskentakoordinaatistoa, ellei toisin mainita.



Kuva 2. Laskentakoordinaatisto.

### 3 Maaperätiedot ja kuormat

#### 3.1 Maaperätiedot

Sillan taustan täytteen paino on laskettu käyttäen täytteen tilavuuspainona  $21 \text{ kN/m}^3$ . Vastaava kitkakulman ominaisarvo on  $\phi = 38^\circ$ . Maanpaine on laskettu käyttäen kitkakulman ominaisarvoa.

Maanpohjan kantokyky lasketaan käyttäen kitkakulman mitoitusarvoa, joka saadaan jakamalla kitkakulman ominaisarvon tangentti osavarmuusluvulla. Tielaitoksen ohjeiden mukaan maan kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,25. Eurocode-ohjejärjestelmän mitoitus-tapauksen C kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,25 ja mitoitus-tapauksen B 1,0. Kitkakulman mitoitusarvoa käytetään laskettaessa kantavuuskaavojen (4.1) ja (4.15) kantavuus- ja muotokertoimia.

#### 3.2 Kuormat

Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto perustuksen kuormista. Siinä on esitetty myös erilaisten ohjejärjestelmien mukaiset kuormien yhdistelykertoimet määräävissä kuormitustapauksissa, kun liikennekuormana on kuormakaavion 1 mukainen liikennekuorma. Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan kuormat yhdistetään kaavan (3.1) perusteella. Eurocodien mukainen kuormien yhdistelyperiaate on kaavan (3.4) mukainen. Eurocodien mukaisissa mitoituksissa taulukossa 1 esiintyvä kuorman yhdistelykerroin on

kuorman osavarmuusluvun ja mahdollisen muuttuvan kuorman yhdistelmäarvon kertoimen tulo. Osavarmuusluvut saadaan taulukoista 3.1, 3.4 ja 3.7 ja muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet taulukoista 3.2, 3.5 ja 3.8.

Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisia mitoituksia tulee tehdä joka ohjejärjestelmälle kaksi. Toinen käyttäen kuorman ja materiaaliparametrien osavarmuuslukuja, jotka on annettu tapaukselle B ja toinen tapauksen C mukaan. Eurocode 7 mainitaan, että usein tapaus C on mitoittava, kun on kyseessä maaperän murtuminen.

Taulukon 1 perusteella kaikkien mitoistustapausten määräävä muuttuva kuorma on maanpaine liikenteestä. Määräävä muuttuva kuorma on etsitty kokeilemalla.

*Taulukko 1.* Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet kriittisille kuormitustapauksille, kun liikennekuormana käytetään kuormakaavion 1 mukaista kuormaa.

Kuormat						Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	TIEL Lk I	Euro 1-3 Lk B	Euro 1-3 Lk C	Euro 1-1 Lk B	Euro 1-1 Lk C	Euro 1-1 NAD Lk B	Euro 1-1 NAD Lk C
<b>Pysyvät kuormat</b>												
Oma paino	-2090		-1050			1	1	1	1	1	1	1
Täyte	-2360		-3020			1	1	1	1	1	1	1
Päällysrakenne	-2370					1	1	1	1	1	1	1
<b>Maanpaine</b>												
- Lepopaine 1)		1460	3190			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
- 70 % lepopaineesta 1)		1020	2230			0	0	0	0	0	0	0
<b>Veden noste</b>												
- Oma paino	530		230			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
- Täyte	260		180			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
- Maanpaine		-60	-40			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
<b>Muuttuvat kuormat</b>												
<b>Liikennekuorma</b>												
- Pystysuora kannella 2)	-1320				1650	1	0,78	0,78	1,05	0,91	1,05	0,91
- Raskas erikoiskuorma 2)	-1220				2440	0	0	0	0	0	0	0
- Pystysuora penkereellä	-270		-470		140	0	0	0	0	0	0	0
- Maanpaine liikenteestä		330	1000			1	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
- Jarrukuorma		180	820			0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Laakerikitka		120	550			0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
<b>Veden noste</b>												
- Oma paino	170		50			0	0	0	0	0	0	0
- Täyte	350		520			0	0	0	0	0	0	0
- Maanpaine		-170	-260			0	0	0	0	0	0	0
<b>Sivusysäys</b>				50	200	0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
<b>Tuulikuorma</b>				40	180	0,5	1,5	1,5	0,9	0,78	0,75	0,65

1) ja 2) keskenään vaihtoehtoisia kuormia

Taulukossa 2 on esitetty kuormien yhdistelykertoimet kriittisille kuormitusyhdistelmille, kun liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

Taulukko 2. Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet kriittisille kuor-  
mitustapauksille, kun liikennekuormana käytetään raskasta erikoiskuormaa.

Kuormat						Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	TIEL Ek	Euro 1-3 Ek B	Euro 1-3 Ek C	Euro 1-1 Ek B	Euro 1-1 Ek C	Euro 1-1 NAD Ek B	Euro 1-1 NAD Ek C
Pysyvät kuormat												
Oma paino	-2090		-1050			1	1	1	1	1	1	1
Täyte	-2360		-3020			1	1	1	1	1	1	1
Päällysrakenne	-2370					1	1	1	1	1	1	1
Maanpaine												
- Lepopaine 1)		1460	3190			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
- 70 % lepopaineesta 1)		1020	2230			0	0	0	0	0	0	0
Veden noste												
- Oma paino	530		230			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
- Täyte	260		180			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
- Maanpaine		-60	-40			1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat												
Liikennekuorma												
- Pystysuora kannella 2)	-1320				1650	0	0	0	0	0	0	0
- Raskas erikoiskuorma 2)	-1220				2440	1	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Pystysuora penkereellä	-270		-470		140	0	0	0	0	0	0	0
- Maanpaine liikenteestä		330	1000			1	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
- Jarrukuorma		180	820			0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Laakerikitka		120	550			0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Veden noste												
- Oma paino	170		50			0	0	0	0	0	0	0
- Täyte	350		520			0	0	0	0	0	0	0
- Maanpaine		-170	-260			0	0	0	0	0	0	0
Sivusysäys				50	200	0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Tuulikuorma				40	180	0,5	1,5	1,5	0,9	0,78	0,75	0,65

1) ja 2) keskenään vaihtoehtoisia kuormia

Taulukosta 2 huomataan, että mitoitus tapauksien Euro 1-3 Ek B ja C raskaan erikoiskuor-  
man yhdistelmäarvon kerroin on 0 taulukon 3.8 mukaan.

4 Kantokykytarkastelu

Erilaisten ohjejärjestelmien mukaisilla kantokykytarkasteluilla osoitetaan, ettei perustuksen  
tehokkaalle pinta-alalle laskettu kriittisen kuormitusyhdistelmän mukainen pohjapaine ylitä  
kantavuuskaavalla saatua maapohjan kantokykyä.

Koska sillan poikkisuuntaiset kuormat ovat merkitykseltään vähäisiä, suoritetaan kantoky-  
kytarkastelu vain sillan pituussuunnassa.

Kantokykykaavojen käytön havannoillistamiseksi täydelliset laskut esitetään mitoitus tapauk-  
sille TIEL Ek ja Euro 1-3 Ek C. Vertailun helpottamiseksi käytettävät kaavat, suureiden  
arvot ja laskut esitetään vierekkäin.



**TIEL Ek**

Kantavuuskaava kitkamaalle

$$\sigma_{of} = \gamma_1' D N_D s_D i_D + \gamma_2' B_t N_B s_B i_B$$

Laskennassa käytettävät arvot

$$L_t = 2 \left( 5 - \frac{M_x}{V} \right)$$

$$B_t = 2 \left( 1,8 - \frac{M_y}{V} \right)$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

$$\gamma_1' = 11 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_2' = 11 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi = 36^\circ$$

$$\phi_n = 30,2^\circ$$

Kantavuuskertoimet

$$N_D = e^{\pi \tan \phi_n} \cdot \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi_n}{2} \right) = 18,8$$

$$N_B = (N_D - 1) \tan \phi_n = 10,3$$

Muotokertoimet

$$s_D = 1 + \sin \phi_n \frac{B_t}{L_t}$$

$$s_B = 1 - 0,3 \frac{B_t}{L_t}$$

Kaltevuuskertoimet

$$i_D = \left( 1 - 0,7 \frac{H_x}{V} \right)^3$$

$$i_B = \left( 1 - \frac{H_x}{V} \right)^3$$

**Euro 1-3 Ek C**

$$\frac{R}{A'} = q' N_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

$$L' = 2 \left( 5 - \frac{M_x}{V} \right)$$

$$B' = 2 \left( 1,8 - \frac{M_y}{V} \right)$$

$$q' = 1,0 \cdot 11 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi = 36^\circ$$

$$\phi' = 30,2^\circ$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \cdot \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) = 18,8$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \phi' = 20,6$$

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi'$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \frac{B'}{L'}$$

$$i_q = \left( 1 - 0,7 \frac{H_x}{R} \right)^3$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{H_x}{R} \right)^3$$

#### 4.1 Pohjapaineen laskeminen

##### TIEL Ek

##### Euro 1-3 Ek C

Mitoituskuormat

$$q_d = \sum_{i=1}^m g_i + q_{k1} + q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5 q_{ki}$$

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki}$$

$$V = -7250 \text{ kN}$$

$$R = -5754 \text{ kN}$$

$$H_x = 1880 \text{ kN}$$

$$H_x = 2336 \text{ kN}$$

$$M_y = 1175 \text{ kNm}$$

$$M_y = 2086 \text{ kNm}$$

$$M_x = 2630 \text{ kNm}$$

$$M_x = 270 \text{ kNm}$$

Mitoituskuormien epäkeskisyyss

$$e_x = \frac{M_y}{V} = \frac{1175}{7250} = 0,162 \text{ m}$$

$$e_x = \frac{M_y}{R} = \frac{2086}{5754} = 0,363 \text{ m}$$

$$e_y = \frac{M_x}{V} = \frac{2630}{7250} = 0,363 \text{ m}$$

$$e_y = \frac{M_x}{R} = \frac{270}{5754} = 0,050 \text{ m}$$

Tehokas pinta-ala

$$L_t = 2 \cdot (5 - 0,363) = 9,275 \text{ m}$$

$$L' = 2 \cdot (5 - 0,050) = 9,900 \text{ m}$$

$$B_t = 2 \cdot (1,8 - 0,162) = 3,276 \text{ m}$$

$$B' = 2 \cdot (1,8 - 0,363) = 2,874 \text{ m}$$

$$A_t = L_t B_t = 30,38 \text{ m}^2$$

$$A' = L' B' = 28,45 \text{ m}^2$$

Pohjapaine tehokkaalle pinta-alalle

$$\sigma_o = \frac{V}{A_t} = \frac{7250}{30,38} = 238,63 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{R}{A_t} = \frac{5754}{28,45} = 202,25 \text{ kN/m}^2$$

#### 4.2 Kantokyvyn laskenta

##### TIEL Ek

##### Euro 1-3 Ek C

Muoto- ja kaltevuuskertoimet

$$s_D = 1 + \sin 30,2^\circ \cdot \frac{3,276}{9,275} = 1,18$$

$$s_q = 1 + \frac{2,874}{9,9} \cdot \sin 30,2^\circ = 1,15$$

$$s_B = 1 - 0,3 \cdot \frac{3,276}{9,275} = 0,89$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{2,874}{9,9} = 0,91$$

$$i_D = \left(1 - 0,7 \cdot \frac{1880}{7250}\right)^3 = 0,55$$

$$i_B = \left(1 - \frac{1880}{7250}\right)^3 = 0,41$$

$$i_q = \left(1 - 0,7 \cdot \frac{2336}{5754}\right)^3 = 0,37$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{2336}{5754}\right)^3 = 0,21$$

Maapohjan kantokyky

$$\begin{aligned}\sigma_{of} &= 11 \cdot 1,0 \cdot 18,8 \cdot 1,18 \cdot 0,55 \\ &+ 11 \cdot 3,276 \cdot 10,3 \cdot 0,89 \cdot 0,41 \\ &= 268,38 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{R}{A'} &= 11 \cdot 1,0 \cdot 18,8 \cdot 1,15 \cdot 0,37 \\ &+ 0,5 \cdot 11 \cdot 2,874 \cdot 20,6 \cdot 0,91 \cdot 0,21 \\ &= 150,22 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Mitoitusvarmuusluku, joka on maapohjan kantokyvyn ja pohjapaineen suhde

$$F_d = \frac{268,38}{238,63} = 1,12$$

$$F_d = \frac{150,22}{202,25} = 0,74$$

Laskentaesimerkistä huomataan, että varsinaisen geoteknisen mitoituksen kaavat ovat aivan samat molemmissa ohjejärjestelmissä. Mitoitustapauksien TIEL Ek ja Euro 1-3 Ek C tuloksien erot aiheutuvat kuormien mitoitusarvojen eroista.

## 5 Laskentaesimerkin tulokset

Edellä annetuilla laskentakaavoilla lasketaan loput mitoitustapaukset, tielaitoksen toinen tapaus, TIEL Lk1 vasemman palstan kaavoilla ja eurocodien mukaiset mitoitukset oikeanpuolisilla kaavoilla. Eurocode-ohjejärjestelmän tapauksen B mukaan kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,0. Joten kitkakulman mitoitusarvo on 36°. Ohjejärjestelmien antamat kuormien mitoitusarvot, perustuksen kantokyky ja pohjapaine on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuormien mitoitusarvot, perustuksen kantokyky ja pohjapaine ohjejärjestelmittäin.

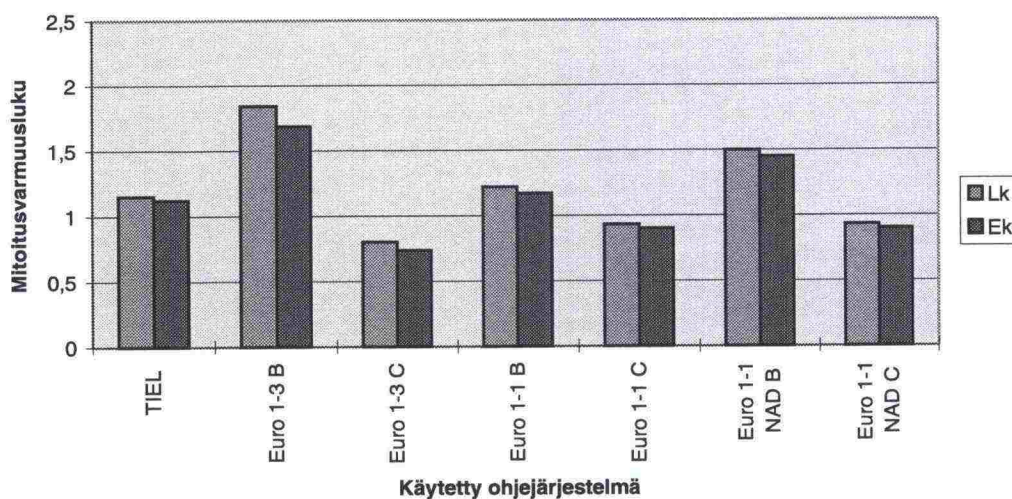
Käytetty ohjejärjestelmä	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	Kantokyky (kN/m <sup>2</sup> )	Pohjapaine (kN/m <sup>2</sup> )
<b>Liikennekuorma</b>							
TIEL Lk1	-7350	1880	1175	45	1840	271,62	235,88
Euro 1-3 Lk B	-6778	2336	2086	60	1550	439,08	237,99
Euro 1-3 Lk C	-6778	2336	2086	60	1550	190,83	237,99
Euro 1-1 Lk B	-7140	2700	3675	89	2105	358,78	295,13
Euro 1-1 Lk C	-7231	2102	2037	77	1824	232,32	250,78
Euro 1-1 ja NAD Lk B	-7258	2490	3141	83	2078	421,77	281,53
Euro 1-1 ja NAD Lk C	-7231	2102	2037	72	1801	232,32	250,61
<b>Erikoiskuorma</b>							
TIEL Ek	-7250	1880	1175	45	2630	268,38	238,63
Euro 1-3 Ek B	-5754	2336	2086	60	270	340,81	202,25
Euro 1-3 Ek C	-5754	2336	2086	60	270	150,22	202,25
Euro 1-1 Ek B	-7035	2700	3675	89	2934	350,47	300,35
Euro 1-1 Ek C	-7140	2102	2037	77	2543	229,26	253,76
Euro 1-1 ja NAD Ek B	-7153	2490	3141	83	2907	413,36	286,04
Euro 1-1 ja NAD Ek C	-7140	2102	2037	72	2519	229,25	253,58



Taulukon 3 perusteella eurocodien mukainen mitoitus tapaus B antaa perustuksen kantavuudelle korkeampia arvoja kuin mitoitus tapaus C. Pohjapaineen arvo on myös hieman suurempi tai sama kuin mitoitus tapauksen C. Tämän laskentaesimerkin mukaan eurocodien mukainen määrävä mitoitus tapaus on tapaus C.

Kuvassa 3 on esitetty perustuksen kantokyvyn ja pohjapaineen suhde laskettuna edellä mainituilla ohjejärjestelmillä. Kantokyvyn ja pohjapaineen suhteesta käytetään nimitystä mitoitusvarmuusluku. Eurocode-mitoituksista on esitetty tapauksien B ja C mukaiset tulokset, jotta tapauksien erot näkyisivät selvästi. Kuvasta 3 huomataan, että tielaitoksen menetelmä antaa suuremman mitoitusvarmuusluvun kuin eurocodien mukaiset määräävät mitoitukset. Tulosten vertailuun parhaiten sopivat mitoitus tapaukset TIEL Lk1, TIEL Ek, Euro 1-3 Lk C ja Euro 1-3 Ek C, koska kuormien yhdistely on suoritettu siltoja koskevien ohjeiden mukaan, ei yleisillä perusteilla. Tämän esimerkin perusteella tielaitoksen käytössä oleva menetelmä on taloudellisempi mitoitusmenetelmä kuin eurocodien mukaiset mitoitusmenetelmät.

Kuvan 3 mukaan kaikkien tapauksien antama varmuustaso vaikuttaa alhaiselta, mutta tulee muistaa, että menetelmien mukaiset varmuudet sisältyvät jo mitoitusvarmuuslukuihin sekä käytetty kantavuuskaavan sisäinen varmuus on noin 2.



Kuva 3. Laskentaesimerkin tulokset.

## LASKENTAESIMERKKI 2. Penkereen varaan perustaminen Vakavuus- ja kantavuuslaskenta

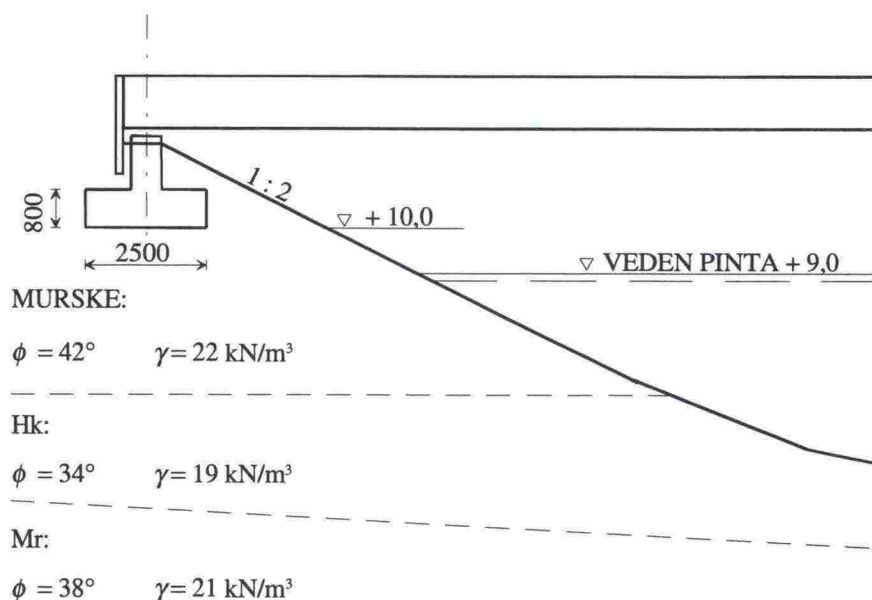
### 1 Käytettävät ohjejärjestelmät

Maanvaraisen sillan perustusten vakavuus- ja kantavuustarkastelut tehdään kansallisten ohjeiden ja eurocode-ohjejärjestelmän mukaan. Jokaisesta ohjejärjestelmästä lasketaan kaksi kuormitustapausta, toisessa kuormitustapauksessa käytetään pystysuorana liikennekuormana tielaitoksen liikennekuormakaavion 1 mukaista liikennekuormaa, toisessa tielaitoksen raskasta erikoiskuormaa.

Tielaitoksen ohjeiden mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä TIEL Lk1 ja TIEL Ek. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisia mitoituksia tehdään 12. Mitoituskuorma ja perustuksen geotekninen kantavuus lasketaan mitoitusapauksille B ja C. Mitoitusapauksille Euro 1-3 Lk B ja C sekä Euro 1-3 Ek B ja C käytetään kuormitusohjeina Eurocode 1, Osaa 1: Suunnitteluperusteet ja Osaa 3: Siltojen liikennekuormat. Geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7. Muut mitoitukset tehdään Eurocode 1, Osan 1 ja siihen liittyvän kansallisen soveltamisasiakirjan (NAD) perusteella. Eurocode 1, Osan 1 kuormitusohjeissa annetaan yleiset suunnitteluperusteet sekä kuormien yhdistelykertoimet rakennuksille. Geoteknisessä mitoituksessa käytetään Eurocode 7 ja siihen liittyvää kansallista soveltamisasiakirjaa. Mitoitusapauksista käytetään lyhenteitä Euro 1-1 Lk B ja C, Euro 1-1 Ek B ja C, Euro 1-1 NAD Lk B ja C sekä Euro 1-1 NAD Ek B ja C.

### 2 Siltatyyppi ja sillan mitat

Silta on jännitetty elementtisilta, jonka kokonaispituus  $L = 24$  m. Perustuksen mitat sekä maakerrosten tilavuuspainot ja kitkakulmat on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Perustuksen mitat sekä maaparametrit.



3 Maaperätiedot ja kuormat

3.1 Maaperätiedot

Maanpohjan vakavuus- ja kantavuustarkastelut tehdään käyttäen kitkakulman mitoitusarvoa, joka saadaan jakamalla kitkakulman ominaisarvon tangentti osavarmuusluvulla. Tielaitoksen ohjeiden mukaan maan kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,25 ja täytteen varaan perustettaessa kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,2. Eurocode-ohjejärjestelmän mitoitusapauksen C kitkakulman tangentin osavarmuusluku on 1,25 ja mitoitusapauksen B 1,0.

3.2 Kuormat

Yhteenveto ominaiskuormista on esitetty taulukossa 1. Siinä on esitetty myös erilaisten ohjejärjestelmien mukaiset kuormien yhdistelykertoimet määrääville kuormitustapauksille, kun liikennekuormana on kuormakaavion 1 mukainen liikennekuorma. Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan kuormat yhdistetään kaavan (3.1) perusteella. Eurocodien mukainen kuormien yhdistelyperiaate on kaavan (3.4) mukainen. Pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuusluvut valitaan ohjejärjestelmän mukaan. Eurocodien mukaisissa mitoituksissa taulukossa 1 esiintyvä muuttuvan kuorman yhdistelykerroin on kuorman osavarmuusluvun ja muuttuvan kuorman yhdistelmäarvon kertoimen tulo. Osavarmuusluvut saadaan taulukoista 3.1, 3.4 ja 3.7 ja muuttuvien kuormien yhdistelmäarvon kertoimet taulukoista 3.2, 3.5 ja 3.8.

Taulukko 1. Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville kuormitustapauksille, kun liikennekuormana käytetään kuormakaavion 1 mukaista kuormaa.

Kuormat					Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Mx (kNm)	TIEL Lk I	Euro 1-3 Lk B	Euro 1-3 Lk C	Euro 1-1 Lk B	Euro 1-1 Lk C	Euro 1-1 NAD Lk B	Euro 1-1 NAD Lk C
Pysyvät kuormat											
Päätytuki	-635				1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Täyte	-230		-193		1	1	1	1	1	1	1
Päällysrakenne	-2200				1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Maanpaine		349	157		1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat											
Liikennekuorma											
- Pystysuora kannella 1)	-1284			1605	1	0,78	0,78	1,05	0,91	1,05	0,91
- Raskas erikoiskuorma 1)	-1142			2570	0	0	0	0	0	0	0
- Pystysuora penkereellä	-145		-122		0,5	0,78	0,78	1,05	0,91	1,05	0,91
- Maanpaine liikenteestä		67	40		0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Jarrukuorma 2)		85	102		0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Jarrukuorma 2)		-85	-102		0	0	0	0	0	0	0
Laakerikitka 3)		117	140		1	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Laakerikitka 3)		-59	-70		0	0	0	0	0	0	0

1), 2) ja 3) keskenään vaihtoehtoisia kuormia.



Taulukossa 2 on esitetty kuormien yhdistelykertoimet määrääville kuormitusyhdistelmille, kun liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

**Taulukko 2.** Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville kuormitustapauksille, kun liikennekuormana käytetään raskasta erikoiskuormaa.

Kuormat					Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Mx (kNm)	TIEL Ek1	Euro 1-3 Ek B	Euro 1-3 Ek C	Euro 1-1 Ek B	Euro 1-1 Ek C	Euro 1-1 NAD Ek B	Euro 1-1 NAD Ek C
<b>Pysyvät kuormat</b>											
Päätytuki	-635				1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Täyte	-230		-193		1	1	1	1	1	1	1
Päällysrakenne	-2200				1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Maanpaine		349	157		1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
<b>Muuttuvat kuormat</b>											
<b>Liikennekuorma</b>											
- Pystysuora kannella 1)	-1284			1605	0	0	0	0	0	0	0
- Raskas erikoiskuorma 1)	-1142			2570	1	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Pystysuora penkereellä	-145		-122		0,5	0,78	0,78	1,05	0,91	1,05	0,91
- Maanpaine liikenteestä		67	40		0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Jarrukuorma 2)		85	102		0,5	0	0	1,05	0,91	1,05	0,91
- Jarrukuorma 2)		-85	-102		0	0	0	0	0	0	0
Laakerikitka 3)		117	140		1	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Laakerikitka 3)		-59	-70		0	0	0	0	0	0	0

1), 2) ja 3) keskenään vaihtoehtoisia kuormia.

Tässä laskentaesimerkissä taulukkojen 1 ja 2 viimeinen ja kolmanneksi viimeinen mitoitus-  
paus antavat saman tuloksen. Niiden antamat mitoituskuormat eivät poikkea toisistaan,  
koska perustukseen ei kohdistu lumi- eikä tuulikuormia. Mitoitustapausten lyhenteinä käy-  
tetään Euro 1-1 ja NAD Lk C ja Euro 1-1 ja NAD Ek C.

#### 4 Vakavuus- ja kantavuustarkastelu

Vakavuustarkastelut tehdään kaikille mitoitustapauksille kahdella eri menetelmällä. Perus-  
tuksen vakavuus lasketaan kahdella liukupintaohjelmalla, jotka ovat FULGEO- ja  
MSLIUKU-ohjelmat. Kantavuustarkastelut tehdään yksinkertaistetuilla maaperätiedoilla  
tielaitoksen ohjeen mukaisella kantavuuskaavalla, joka ottaa huomioon kaltevan maanpinnan  
vaikutuksen.

Laskentamenetelmien erojen havainnollistamiseksi täydelliset laskut esitetään mitoitus-  
tapauksille TIEL Ek ja Euro 1-3 Ek C. Vertailun helpottamiseksi käytettävät kaavat, suurei-  
den arvot ja laskut esitetään vierekkäin.

4.1 Pohjapaineen laskeminen

TIEL Ek

Euro 1-3 Ek C

Mitoituskuormat

$$q_d = \sum_{i=1}^m g_i + q_{k1} + q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5 q_{ki}$$

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki}$$

$$\begin{aligned} V &= -4280 \text{ kN} \\ H_x &= 542 \text{ kN} \\ M_y &= 114 \text{ kNm} \\ M_x &= 2570 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= -4170 \text{ kN} \\ H_x &= 629 \text{ kN} \\ M_y &= 113 \text{ kNm} \\ M_x &= 0 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Mitoituskuormien epäkeskisyys ja perustuksen tehokas pinta-ala

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{M_y}{V} = \frac{114}{4280} = 0,027 \text{ m} \\ e_y &= \frac{M_x}{V} = \frac{2570}{4280} = 0,601 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{M_y}{R} = \frac{113}{4170} = 0,027 \text{ m} \\ e_y &= \frac{M_x}{R} = \frac{0}{4170} = 0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_t &= 2 \cdot (5 - 0,601) = 8,799 \text{ m} \\ B_t &= 2 \cdot (1,250 - 0,027) = 2,447 \text{ m} \\ A_t &= L_t B_t = 21,53 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L' &= 2 \cdot (5 - 0) = 10,0 \text{ m} \\ B' &= 2 \cdot (1,250 - 0,027) = 2,446 \text{ m} \\ A' &= L' B' = 24,46 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pohjapaine tehokkaalle pinta-alalle

$$\sigma_o = \frac{V}{A_t} = \frac{4280}{21,53} = 198,8 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{R}{A_t} = \frac{4170}{24,46} = 170,5 \text{ kN/m}^2$$

Samoin lasketaan muut mitoitus tapaukset, tielaitoksen toinen tapaus, TIEL Lk1 vasemman palstan kaavoilla ja eurocodien mukaiset mitoitukset oikeanpuolisilla kaavoilla. Ohjejärjestelmien antamat laskentakuormat ja pohjapaineet on esitetty taulukossa 3, kun liikennekuormana on käytetty liikennekuormakaavion 1 mukaista kuormaa.

Taulukko 3. Mitoituskuormat ja kuormien aiheuttamat pohjapaineet, kun liikennekuormana on liikennekuormakaavion 1 mukainen kuorma.

Käytetty ohjejärjestelmä	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Mx (kNm)	Pohjapaine (kN/m2)
TIEL Lk1	-4422	542	114	1605	194,72
Euro 1-3 Lk B	-5166	629	113	1245	220,99
Euro 1-3 Lk C	-5166	629	113	1245	220,99
Euro 1-1 Lk B	-5558	806	250	1685	245,49
Euro 1-1 NAD Lk B	-5132	754	226	1685	227,77
Euro 1-1 ja NAD Lk C	-4365	639	164	1461	192,94

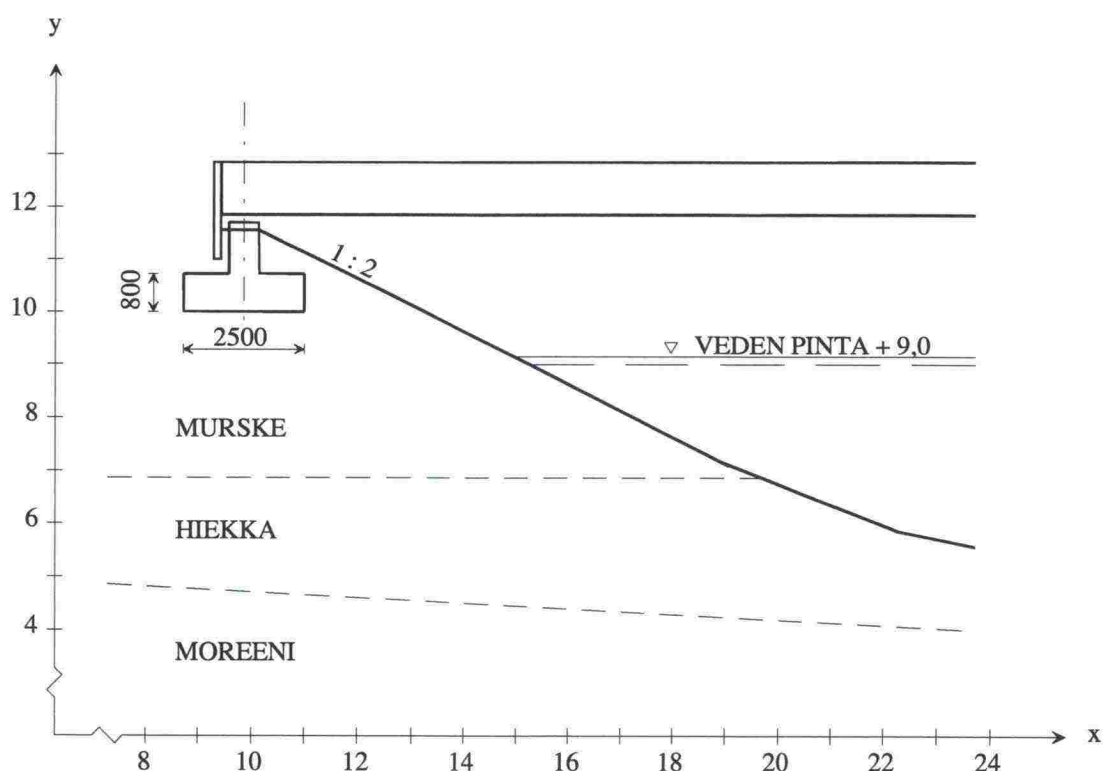
Taulukossa 4 on esitetty perustuksen mitoituksukuormat ja kuormien aiheuttamat pohjapaineet, kun liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

*Taulukko 4.* Mitoituksukuormat ja kuormien aiheuttamat pohjapaineet, kun liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

Käytetty ohjejärjestelmä	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Mx (kNm)	Pohjapaine (kN/m <sup>2</sup> )
TIEL Ek	-4280	542	114	2470	198,78
Euro 1-3 Ek B	-4170	629	113	0	170,50
Euro 1-3 Ek C	-4170	629	113	0	170,50
Euro 1-1 Ek B	-5409	806	250	2699	249,55
Euro 1-1 NAD Ek B	-4983	754	226	2699	231,98
Euro 1-1 ja NAD Ek C	-4236	639	164	2339	196,57

## 4.2 Laskentakoordinaatisto

Kuvassa 2 on esitetty laskuissa käytetty koordinaatisto.



*Kuva 2.* Laskentakoordinaatisto.

## 4.3 Liukupinta-analyysi FULGEO-ohjelmalla

FULGEO-ohjelmaan annetaan lähtötiedoiksi maakerrostiedot, ulkoisen vedenpinnan taso ja kuormitustiedot. Laskennassa käytetään maaparametrien ja kuormien mitoituservoja. Ohjelmaan annetaan erikseen kiinteä ja muuttuva pystykuorma sekä vaakakuorma. Pystykuormat annetaan ohjelmassa pohjapaineena (kN/m<sup>2</sup>). Vaakakuorma saadaan jakamalla vaakakuorman mitoituservo perustuksen tehokkaalla leveydellä.



Mitoitustapauksen TIEL Lk1 lähtötiedosto on esitetty kuvassa 3.

MAAKERROKSET:					
	0	1	2		
fii (ast)	36.90	28.40	32.00		
C (kN/m <sup>2</sup> )	0.00	0.00	0.00		
G (kN/m <sup>3</sup> )	22.00	19.00	21.00		
	X H	X H	X H		
	5.00 10.00	5.00 7.00	5.00 5.00		
	13.20 10.00	19.20 7.00	40.00 3.50		
	19.20 7.00	22.20 6.30	60.00 3.50		
	22.20 6.30	60.00 6.30			
	60.00 6.30				
HUOKOSPAINETASOT:					
	0.00 kPa				
	X H				
	5.00 9.00				
	60.00 9.00				
Ulkoisen veden taso +9.00					
ULKOISET KUORMAT:					
Kiinteä pystykuorma	134.98 kN/m <sup>2</sup>	alueella	8.55 ...	11.00	
Muuttuva pystykuorma	59.74 kN/m <sup>2</sup>	alueella	8.55 ...	11.00	
Vaakakuorma	58.47 kN	korkeudella		+10.00	

Kuva 3. Mitoitustapauksen TIEL Lk1 lähtötiedosto.

Vaarallisin liukupinta laskettiin käyttämällä kiinteätä liukupinnan sivuamispistettä. Sivua-  
mispisteenä käytettiin perustuksen tehokkaan leveyden reunaa. Laskennassa käytettiin 1 m ×  
1 m hilaa. Mitoitustapauksen TIEL Lk1 laskennan tulos on esitetty kuvassa 4. Pienin var-  
muusluku on liukupinnalla, jonka keskipiste on kohdassa x = 17 ja y = 15.

Keskipiste								
X	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	
Y								
20.00	1.43	1.32	1.20	1.10	1.06	1.08	1.19	Varmuus
	11.90	12.47	13.09	13.76	14.46	15.20	15.97	Säde
19.00	1.38	1.29	1.14	1.06	1.04	1.09	1.25	Varmuus
	11.07	11.68	12.35	13.05	13.79	14.56	15.36	Säde
18.00	1.34	1.24	1.08	1.03	1.04	1.16	1.32	Varmuus
	10.28	10.93	11.64	12.38	13.16	13.97	14.80	Säde
17.00	1.26	1.14	1.04	1.01	1.06	1.22	1.41	Varmuus
	9.52	10.22	10.97	11.76	12.58	13.42	14.28	Säde
16.00	1.22	1.06	1.01	1.02	1.14	1.30	1.51	Varmuus
	8.81	9.57	10.36	11.19	12.05	12.93	13.82	Säde
15.00	1.14	1.03	1.01	1.07	1.21	1.40	1.64	Varmuus
	8.16	8.97	9.82	10.69	11.58	12.49	13.42	Säde
14.00	1.08	1.02	1.02	1.14	1.31	1.54	1.79	Varmuus
	7.59	8.46	9.35	10.26	11.19	12.13	13.08	Säde
Ympyrät sivuavat pistettä, X = 8.55 ja Y = 10.00								

Kuva 4. Mitoitustapauksen TIEL Lk1 laskennan tulos.

FULGEO-ohjelmalla tehtiin vakavuusanalyysi kaikille mitoitus tapauksille. Tielaitoksen mitoitus tapauksille luonnontilaisen maan kitkakulman tangentin osavarmuus luku on 1,25 ja täyteen 1,2. Eurocodien tapauksen B osavarmuus luku on 1,0 ja tapauksen C 1,25. Tapauksen kuormitustiedot, kiinteät sivuamispisteet ja vaarallisimpien liukupintojen antamat mitoitusvarmuusluvut on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Vakavuusanalyysin kuormitustiedot ja tulokset FULGEO-ohjelmalla.

Käytetty ohjejärjestelmä	Pysyvä pystykuorma (kN/m <sup>2</sup> )	Muuttuva pystykuorma (kN/m <sup>2</sup> )	Vaakakuorma (kN/jm)	Kiinteä sivuamispiste (x,y)	Liukupinnan keskipiste (x,y)	Mitoitusvarmuusluku
<b>Liikennekuorma</b>						
TIEL Lk1	134,98	59,74	58,47	8,55; 10	17, 15	1,01
Euro 1-3 Lk B	173,56	47,44	66,08	8,54; 10	17, 16	1,19
Euro 1-3 Lk C	173,56	47,44	66,08	8,54; 10	17, 15	0,96
Euro 1-1 Lk B	179,22	66,28	85,86	8,59; 10	17, 15	1,14
Euro 1-1 NAD Lk B	180,05	47,41	80,72	8,59; 10	17, 15	1,16
Euro 1-1 ja NAD Lk C	135,47	57,48	68,53	8,58; 10	17, 15	0,97
<b>Erikoiskuorma</b>						
TIEL Ek	142,37	56,41	61,59	8,55; 10	17, 15	1,00
Euro 1-3 Ek B	165,90	4,60	62,91	8,55; 10	17, 16	1,24
Euro 1-3 Ek C	165,90	4,60	62,91	8,55; 10	17, 15	1,00
Euro 1-1 Ek B	187,20	62,35	89,59	8,59; 10	17, 15	1,13
Euro 1-1 NAD Ek B	188,87	43,11	84,52	8,59; 10	17, 15	1,15
Euro 1-1 ja NAD Ek C	142,23	54,35	71,84	8,58; 10	17, 15	0,96

Taulukon 5 mukaan eurocodien mukaisista mitoituksista määräävä mitoitus tapaus on aina tapaus C, joka yleensä mitoittaa maaperän murtumiseen liittyvät tapaukset.

#### 4.4 Liukupinta-analyysi MSLIUKU-ohjelmalla

MSLIUKU-ohjelmaan annetaan lähtötiedoiksi maakerrostiedot, ulkoisen vedenpinnan taso ja kuormitustiedot. Laskennassa käytetään maaparametrien ja kuormien mitoitusarvoja. Ohjelmaan annetaan erikseen maan tilavuuspaino pohjaveden ylä- ja alapuolella. Pystykuormat annetaan ohjelmassa tilavuuspainona (kN/m<sup>3</sup>). Vaakakuorma saadaan jakamalla vaakakuorman mitoitusarvo perustuksen tehokkaalla leveydellä.

Vaarallisin liukupinta laskettiin käyttämällä kiinteää liukupinnan sivuamispistettä. Sivuamispisteenä käytettiin perustuksen tehokkaan leveyden reunaa. Laskennassa käytettiin 100 lamellia.

MSLIUKU-ohjelmalla tehtiin vakavuusanalyysi kaikille mitoitus tapauksille. Tapauksen kuormitustiedot, kiinteät sivuamispisteet, liukupintojen keskipisteet ja vaarallisimpien liukupintojen antamat mitoitusvarmuusluvut on esitetty taulukossa 6.

Taulukon 6 mukaan eurocodien mukaisista mitoituksista määräävä mitoitus tapaus on aina tapaus C, joka yleensä mitoittaa maaperän murtumiseen liittyvät tapaukset.

Taulukko 6. Vakavuusanalyysin kuormitustiedot ja tulokset MSLIUKU-ohjelmalla.

Käytetty ohjejärjestelmä	Pystykuorma (kN/m <sup>3</sup> ) *	Vaakakuorma (kN/jm)	Kiinteä sivuaamispiste (x,y)	Liukupinnan keskipiste (x,y)	Mitoitus- varmuusluku
Liikennekuorma					
TIEL Lk1	234,40	58,47	8,55; 10	18, 17	0,93
Euro 1-3 Lk B	276,24	66,08	8,54; 10	18, 17	1,11
Euro 1-3 Lk C	276,24	66,08	8,54; 10	18, 17	0,89
Euro 1-1 Lk B	306,86	85,86	8,59; 10	18, 17	1,06
Euro 1-1 NAD Lk B	284,71	80,72	8,59; 10	18, 17	1,07
Euro 1-1 ja NAD Lk C	241,18	68,53	8,58; 10	18, 17	0,89
Erikoiskuorma					
TIEL Ek	248,48	61,59	8,55; 10	18, 17	0,92
Euro 1-3 Ek B	213,21	62,91	8,55; 10	18, 17	1,13
Euro 1-3 Ek C	213,21	62,91	8,55; 10	18, 17	0,91
Euro 1-1 Ek B	311,94	89,59	8,59; 10	18, 17	1,05
Euro 1-1 NAD Ek B	289,98	84,52	8,59; 10	18, 17	1,06
Euro 1-1 ja NAD Ek C	245,71	71,84	8,58; 10	18, 17	0,89

\* Perustuksen korkeus 0,8 m, pohjapaine jaetaan 0,8 m.

#### 4.5 Mitoitus kantokykykaavan perusteella

Kantokykykaavamitoituksessa tarkistetaan, ettei perustuksen tehokkaalle pinta-alalle laskettu määräävän kuormitusyhdistelmän mukainen pohjapaine ylitä kantavuuskaavalla saatua maapohjan kantokykyä.

Maanpinnan ollessa kalteva, on kantavuuskaavalla laskettua kantokykyä pienennettävä. Pienennyskertoimen voidaan käyttää tielaitoksen ohjeen mukaista kaavaa

$$g = (1 - 0,5 \tan \beta)^5,$$

missä

$g$  on kantavuuskaavan pienennyskerroin ja

$\beta$  on luiskan kaltevuus vaakatason suhteen.

Kantavuuskaavaa käytettäessä pitää maaperän ominaisuudet arvioida yhdellä kitkakulman arvolla. Tässä laskussa arviona on käytetty 38°, josta kitkakulman mitoitusarvoksi tulee 32,0° tielaitoksen ohjeiden ja eurocodien mitoitustapauksen C mukaisille mitoitustapauksille. Eurocodien mitoitustapaus B lasketaan käyttäen kitkakulman ominaisarvoa mitoitusarvona. Maan tilavuuspainona perustamistason yläpuolella on käytetty 22 kN/m<sup>3</sup>. Perustamistason alapuolella on käytetty tielaitoksen ohjeen mukaista tilavuuspainon arvoa, jonka arvo riippuu pohjavedenpinnan etäisyydestä perustamistasosta ja perustuksen tehokkaasta leveydestä.

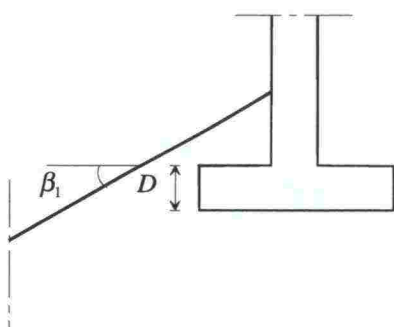
Kantokykykaavaan perustuvassa mitoituksessa perustuksen kantokyky lasketaan samoin kuin laskentaesimerkissä 1. Laskentaesimerkin 1 mukaisilla kaavoilla saadaan vaakasuoran maan kantokyky, jota korjataan pienennyskertoimella. Pienennyskerroin voidaan laskea kahdella eri tavalla. Tielaitoksen ohjeen mukaan mitoituskantokykyksi valitaan suurempi saaduista arvoista. Pienennyskertoimen laskentatavat 1 ja 2 on esitetty kuvassa 4.



Laskentatapa 1:

perustussyvyys kuvan mukaisesti

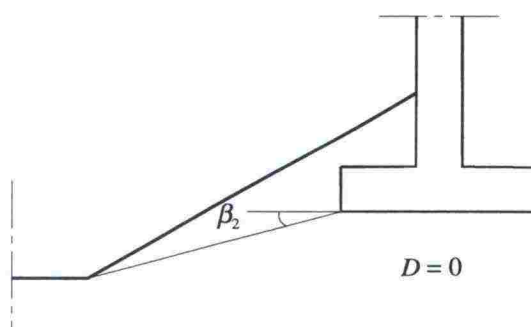
$$\beta = \beta_1$$



Laskentatapa 2:

perustussyvyys = 0

$$\beta = \beta_2$$



Kuva 5. Kaltevan maanpinnan laskentatavat 1 ja 2.

Laskentatavan 1 mukaan kulma  $\beta = 26,57^\circ$  ja perustamissyvyys  $D = 1,1$  m. Laskentatavan 2 mukaan  $\beta = 20,10^\circ$  ja perustamissyvyys  $D = 0$ .

Kaikille mitoistustapauksille lasketaan pienennyskertoimen avulla kaltevan maan kantokyky. Taulukossa 7 on esitetty laskentatavoilla 1 ja 2 saadut kaltevan maan kantokyvyt sekä mitoitusvarmuusluvut. Mitoitusvarmuusluku on kaltevan maan kantokyvyn ja pohjapaineen suhde. Tässä esimerkissä laskentatapa 1 on mitoittava, koska se antaa suuremman kantokyvyn perustukselle.

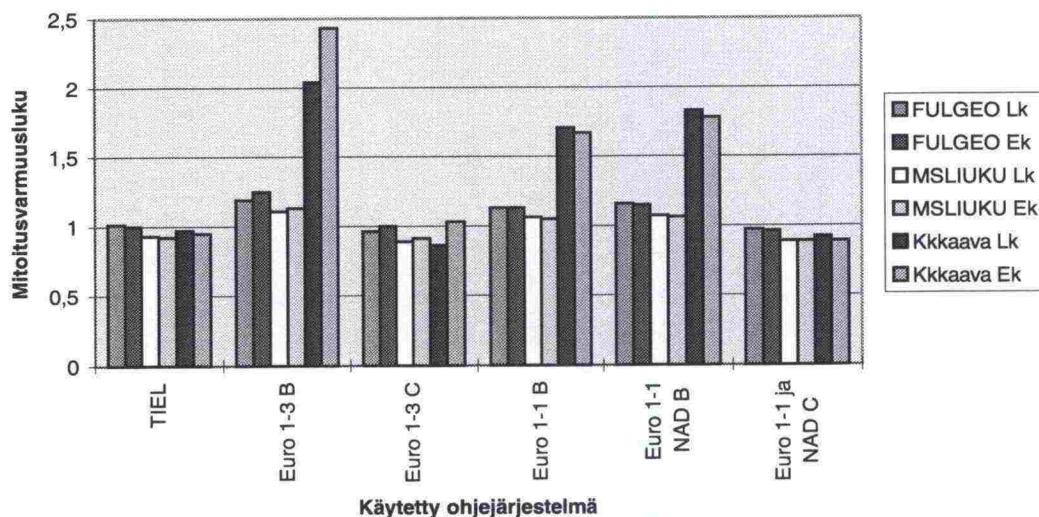
Taulukko 7. Laskentatulokset kantokykykaavaan perustuen.

Käytetty ohjejärjestelmä	Vaakasuoran maan kantokyky Tapa 1 (kN/m <sup>2</sup> )	Kaltevan maan kantokyky Tapa 1 (kN/m <sup>2</sup> )	Mitoitus- varmuusluku Tapa 1	Vaakasuoran maan kantokyky Tapa 2 (kN/m <sup>2</sup> )	Kaltevan maan kantokyky Tapa 2 (kN/m <sup>2</sup> )	Mitoitus- varmuusluku Tapa 2
Liikennekuorma						
TIEL Lk1	799,80	189,80	0,97	308,72	112,43	0,58
Euro 1-3 Lk B	1891,03	448,75	2,03	838,93	305,52	1,38
Euro 1-3 Lk C	801,51	190,20	0,86	310,88	113,22	0,51
Euro 1-1 Lk B	1759,87	417,63	1,70	763,83	278,17	1,13
Euro 1-1 NAD Lk B	1751,6	415,67	1,82	758,97	276,40	1,21
Euro 1-1 ja NAD Lk C	746,31	177,10	0,92	282,59	102,91	0,53
Erikoiskuorma						
TIEL Ek	792,53	188,07	0,95	302,84	110,29	0,55
Euro 1-3 Ek B	1734,38	411,65	2,41	758,36	170,50	1,62
Euro 1-3 Ek C	736,72	170,50	1,03	281,02	102,34	0,60
Euro 1-1 Ek B	1742,42	413,48	1,66	749,73	273,03	1,09
Euro 1-1 NAD Ek B	1732,3	411,09	1,77	743,56	270,79	1,17
Euro 1-1 ja NAD Ek C	738,34	175,21	0,89	276,78	100,80	0,51

Taulukon 7 perusteella eurocodien mukaisista mitoituksista määräävä mitoistustapaus on aina tapaus C, joka yleensä mitoittaa maaperän murtumiseen liittyvät tapaukset.

## 5 Laskentaesimerkin tulokset

Laskelmat tehtiin kolmella eri menetelmällä kaikille mitoistustapauksille. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoistuksista mitoittava tapaus oli aina tapaus C. Kaikkien menetelmien antamat tulokset ohjejärjestelmittäin on esitetty kuvassa 5.



Kuva 6. Laskentaesimerkin tulokset.

Laskentaesimerkin perusteella voidaan päätellä, että laskentamenetelmä ja käytetty ohjejärjestelmä vaikuttavat tulokseen. Eri laskentamenetelmien antamat tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, kun verrataan tielaitoksen ja eurocodien määräävien mitoistustapausten antamia mitoistusvarmuuslukuja toisiinsa. Tulosten vertailuun soveltuvat parhaiten kuvan 5 mitoistustapaukset TIEL ja Euro 1-3 C, koska kuormien yhdistely on suoritettu siltoja koskevien ohjeiden mukaan, ei yleisillä perusteilla.

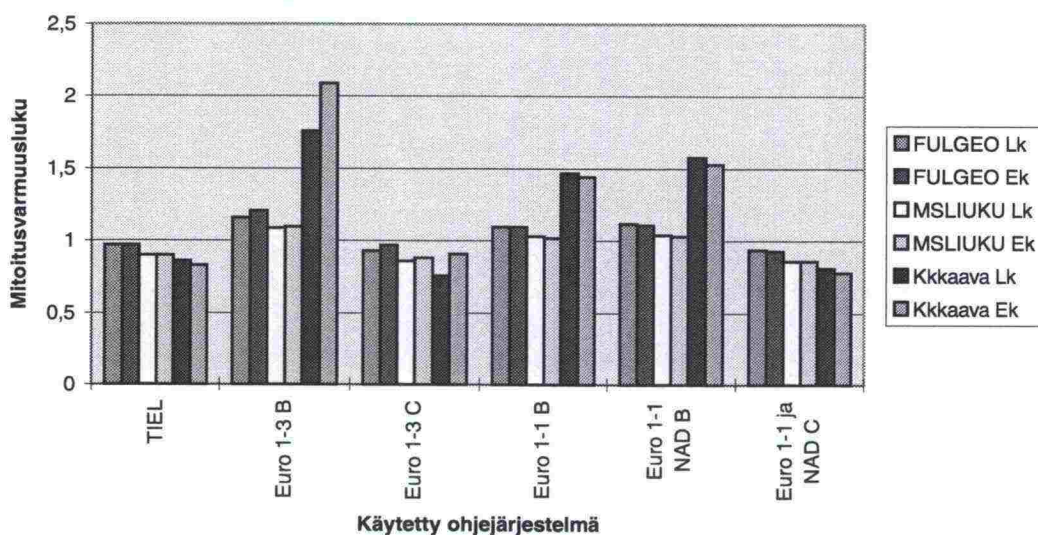
Tielaitoksen ohjeiden perusteella tehdyistä mitoistuksista määräävä tapaus on TIEL Ek, jossa pystysuorana liikennekuormana käytetään raskasta erikoiskuormaa. Eurocode-ohjejärjestelmän siltoja koskevien ohjeiden mukaan tehdyistä mitoistuksista tapaus Euro 1-3 Lk C on määräävä. FULGEO-ohjelmalla tapauksen Euro 1-3 Lk C antama mitoistusvarmuusluku on 0,96 ja tapauksen TIEL Ek 1,00. MSLIUKU-ohjelmalla vastaavat luvut ovat 0,89 ja 0,92 sekä kaltevan maanpinnan kantavuuskaavalla 0,86 ja 0,95. Laskentaesimerkin mukaan tielaitoksen menetelmä on hieman taloudellisempi mitoistusmenetelmä kuin eurocodien mukainen menetelmä.

Kaltevan maanpinnan kantavuuskaavamenetelmää käytettäessä yksinkertaistettiin maaperätietoja. Tuloksista huomataan, että mitoistustapaukset B antavat huomattavasti suurempia mitoistusvarmuuslukuja kuin liukupinta-analyysiin perustuvat tapaukset B. Kantavuuskaavan murtopinta perustuu logaritmiseen spiraaliin. Logaritmiseen spiraalin muodosta johtuu, että suurilla kitkakulman arvoilla kantavuuskaava antaa liian korkeita arvoja kantokyvylle. Alhaisilla kitkakulman arvoilla kantavuuskaava antaa luotettavia arvoja perustuksen kanto-kyvylle.



Tutkitaan vielä maaparametrien valinnan vaikutusta tuloksiin. Suoritetaan kaikki samat mitoituslaskelmat tielaitoksen mitoitustapauksille sekä eurocodien-ohjejärjestelmän mukaisille mitoitustapauksille. Liukupinta-analyyseissä pienennetään hiekkamaakerroksen kitkakulmaa kaksi astetta. Lasketaan eri ohjejärjestelmien mukainen uusi hiekkakerroksen kitkakulman mitoitusarvo. Kaltevan maanpinnan kantokykykaavamitoituksessa käytetään keskimääräistä kitkakulman ominaisarvoa  $37^\circ$ .

Mitoituslaskelmat tehdään muutetuilla maaparametreilla kolmen eri menetelmän mukaan kaikille mitoitustapauksille. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 6.



Kuva 7. Laskentaesimerkin tulokset muutetuilla lähtötiedoilla.

Muutetuilla maaperätiedoilla FULGEO-ohjelma antaa tapauksen Euro 1-3 Lk C mitoitusvarmuusluvuksi 0,93 ja tapauksen TIEL Ek 0,97. Vastaavat mitoitusvarmuusluvut ovat MSLIUKU-ohjelmalla 0,86 ja 0,90 ja kantavuuskaavalla 0,76 ja 0,83.



## **LASKENTAESIMERKKI 3. Ristonmaan risteysilta Suljetut teräsputkipaalut, tuki G vasen paalu**

### **1 Käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusmenetelmät**

Teräsputkipaalun kantavuuslaskelmat tehdään neljän erilaisen menetelmän mukaan. Käytettäviä menetelmiä ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvat menetelmät. Staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä paalun murtokuorma lasketaan julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Paalun murtokuorma lasketaan viidellä dynaamisella paalutuskaavalla. Kaikilla mitoitusmenetelmillä lasketaan eri ohjejärjestelmien mukaiset mitoitusastapaukset. Erilaisten ohjejärjestelmien mukaisia mitoitusastapauksia on kahdeksan.

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan tehdään kaksi mitoitusastasta, toinen sallittujen jännitysten menetelmän mukaan ja toinen käyttäen rajatilamenetelmää. Sallittujen jännitysten menetelmän mukainen mitoitus on esitetty tielaitoksen ohjeessa Teräsputkipaalut. Rajatilamitoituksen mukaan paalun geotekninen kantavuus lasketaan Suurpaalutusohjeen mukaan ja kuormat yhdistetään ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan. Tielaitoksen ohjeiden mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä TIEL-sall ja TIEL-rajat.

Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisissa mitoituksissa lasketaan tapauksen B ja C mukaiset mitoitusastat, joista toinen on antaa määräävän arvon paalun kantavuudelle. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisia mitoitusastapauksia on kuusi. Ensin lasketaan tapaukset, joiden mitoituksessa käytetään kuormitusohjeina Eurocode 1, Osaa 1: Suunnitteluperusteet ja Osaa 3: Siltojen liikennekuormat. Geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7. Mitoituksista käytetään lyhenteitä Euro 1-3 B ja C. Neljä mitoitusastasta tehdään Eurocode 1, Osan 1 ja siihen liittyvän kansallisen soveltamisasiakirjan (NAD) mukaan. Eurocode 1, Osan 1 kuormitusohjeissa annetaan yleiset suunnitteluperusteet sekä kuormien yhdistelykertoimet rakennuksille. Geoteknisessä mitoituksessa käytetään Eurocode 7 ja siihen liittyvää kansallista soveltamisasiakirjaa. Mitoitusastapauksista käytetään lyhenteitä Euro 1-1 B ja C sekä Euro 1-1 NAD B ja C.

Tielaitoksen ohjeen Teräsputkipaalut mukaan käytetään kokonaisvarmuusmenetelmää paalun geoteknisen kantavuuden määrittämiseen. Kokonaisvarmuusmenetelmässä paalun mitoituskuorma saadaan siten, että ominaiskuorman suuruisina otetaan kaikki pysyvät kuormat, pystysuora liikennekuorma ja määräävä muuttuva kuorma. Muut muuttuvat kuormat vaikuttavat puolella ominaiskuorman arvolla. Staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen ja dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuvissa mitoitusmenetelmissä kokonaisvarmuuskertoimena käytetään 2,5-3,0. Dynaamisiin koekuormituksiin perustuvassa menetelmässä kokonaisvarmuuskerroin on 2,0. Paalun geotekninen kantavuus jaetaan kokonaisvarmuuskertoimella. Saatua kantavuuden arvoa verrataan mitoituskuormaan.

Muut mitoitusastapaukset lasketaan rajatilamenetelmällä. Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan paalun mitoituskuorma saadaan siten, että pysyvät kuormat otetaan ominaiskuorman suuruisina, määräävä muuttuva kuorma 1,3-kertaisena ja muut muuttuvat kuormat 0,8-kertaisina. Eurocodien mukaisissa mitoituksissa pysyvät kuormat

kerrotaan ohjeiden mukaisilla osavarmuusluvuilla. Muuttuvat kuormat kerrotaan osavarmuusluvuilla ja mahdollisilla yhdistelmäarvon kertoimilla.

Suurpaalutusohjeen, Eurocode 7 ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla. Kaikkien ohjejärjestelmien mukaan lyöntipaalujen vaippa- ja kärkikantavuuden sekä paalun kantavuuden ominaisarvon osavarmuusluku on 1,3. Geoteknisen kantavuuden laskentaan käytetään paalun kantavuuden ominaisarvoa, jos paalun kantavuutta ei pystytä jakamaan vaippa- ja kärkikantavuuteen.

Paalun vaippa- ja kärkikantavuuden tai koko paalun kantavuuden ominaisarvo saadaan jakamalla mitattu tai laskettu murtokuorma  $\xi$ -kertoimella. Kertoimen arvo riippuu murtokuorman laskentatavasta ja käytetystä ohjejärjestelmästä. Suurpaalutusohjeen ja Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan kertoimen arvo on 1,6, jos murtokuorman laskenta perustuu pohjatutkimustuloksiin. Eurocode 7 mukainen arvo on 1,5. Jos murtokuorman arvo perustuu staattisiin tai dynaamisiin koekuormituksiin saadaan  $\xi$ -kerroin seuraavista taulukoista. Taulukossa 1 on esitetty Eurocode 7 mukaiset  $\xi$ -kertoimen arvot.

Taulukko 1. Koekuormitettujen paalujen  $\xi$ -kertoimet Eurocode 7 mukaan.

Kuormituskokeiden määrä	1	2	> 2
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn keskiarvolle	1,5	1,35	1,3
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn alimmalle arvolle	1,5	1,25	1,1

Taulukossa 2 on esitetty Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan ja Suurpaalutusohjeen mukaiset  $\xi$ -kertoimet.

Taulukko 2. Koekuormitettujen paalujen  $\xi$ -kertoimet Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan ja Suurpaalutusohjeen mukaan.

Kuormitettujen paalujen lukumäärä	< 10 % *	≥ 10 %	≥ 25 %	≥ 50 %	100 %
Staattiset koekuormitukset					
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn keskiarvolle	1,35	1,30	1,25	1,20	1,10
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn alimmalle arvolle	1,25	1,20	1,15	1,10	1,00
Dynaamiset koekuormitukset					
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn keskiarvolle	1,50	1,45	1,40	1,35	1,25
$\xi$ -kerroin murtokantokyvyn alimmalle arvolle	1,40	1,35	1,30	1,25	1,15

\* Koekuormitettujen paalujen määrän on oltava vähintään kaksi.

Molempien taulukoiden mukaan kantokyvyn ominaisarvo lasketaan murtoarvon keskiarvolle ja alimmalle arvolle. Mitoittavaksi arvoksi valitaan pienempi arvo.

## 2 Paaluun kohdistuvat kuormat

Tuen G teräspuutkipaaluun kohdistuvat ominaiskuormat ja erilaisten ohjejärjestelmien mukaiset osavarmuusluvut ja laskentakuormat on esitetty taulukossa 3. Paalua rasittaa vain yksi muuttuva kuorma, joten se on määräävä muuttuva kuorma. Eurocodien mukaisissa mitoituksissa määräävä muuttuva kuorma kerrotaan pelkästään osavarmuusluvulla.

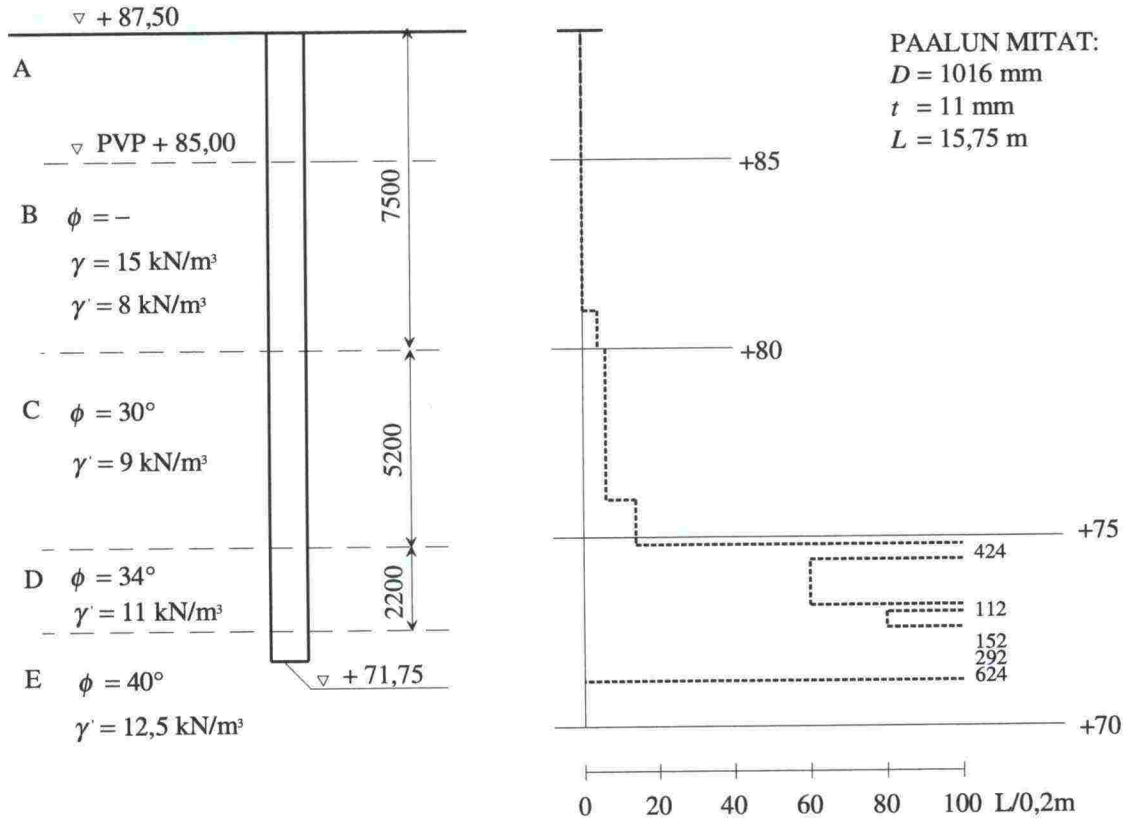


Taulukko 3. Yhteenveto teräsputkipaalan kuormista, ohjejärjestelmien mukaiset kuormien osavarmuusluvut ja mitoituskuormat.

Kuormat	Kuormien osavarmuusluvut								
	V (kN)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat									
Kuorma kannelta	3276	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Pilari	199	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Paalu	319	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat									
Liikennekuorma	1782	1	1,3	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Mitoituskuorma (kN)		5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111

3 Maaperätiedot ja paalun mitat

Kuvassa 1 on esitetty teräsputkipaalan mitat, maaperätiedot sekä keskimääräinen heijarikai-rausdiagrammi. Suljettu teräsputkipaalu on varustettu kalliokärjellä. Paalu on upotettu Franki-paalutuskalustolla. Upotuksen jälkeen paalu on betonoitu.



Kuva 1. Maaperätiedot ja paalun mitat.



## 4 Paalun kantavuus

Paalun kantavuus lasketaan neljään erilaiseen menetelmään perustuen. Käytettävät menetelmät ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormitustuloksiin perustuvat menetelmät.

### 4.1 Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva mitoitus

Staattiseen kantavuuskaavaan perustuvalla menetelmällä lasketaan paalun murtokuorma julkaisujen Teräsputki-paalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Julkaisun Teräsputki-paalut mukaan paalun kärkivastuksen rajoittava arvo on 20 MPa vaippavastuksen rajoittavan arvon ollessa 0,15 MPa.

Staattinen kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Kärkivastus:

$$q_p = \sigma_{vp} \cdot N_q$$

Molempien ohjeiden mukaan tehokas pystysuora jännitys lasketaan ottamalla huomioon maakerrosten tehokas paino enintään  $10d$  paalun kärjen yläpuolella.

$$10d = 10,16 \text{ m}$$

$$\sigma_{vp} = 1,91 \cdot 8 + 5,2 \cdot 9 + 2,2 \cdot 11 + 0,85 \cdot 12,5 = 96,905 \text{ kN/m}^2$$

Keskimääräinen kitkakulma:

Molempien ohjeiden mukaan keskimääräinen kitkakulma otetaan keskimääräisenä  $5d$  paalun kärjen yläpuolelta  $3d$  paalun kärjen alapuolelle.

$$5d = 5,08 \text{ m}$$

$$3d = 3,048 \text{ m}$$

$$\phi = \frac{2,03 \cdot 30 + 2,2 \cdot 34 + (0,85 + 3,048) \cdot 40}{5,08 + 3,048} = 36^\circ$$

$$\Rightarrow N_q = 85$$

$$q_p = 96,905 \cdot 85 = 8236,925 \text{ kN/m}^2$$

Kärkikantavuus:

$$A_{pk}q_p = \pi(\frac{1,016}{2})^2 \cdot 8236,925 = 6677,938 \text{ kN}$$

Vaippavastus:

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \phi_a$$

Taulukossa 4 on esitetty vaippavastuksen laskeminen maakerroksittain julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Tulosten erot johtuvat ohjeiden erilaisista mitoituskäyristä sekä tehollisen jännityksen laskennan eroista. Suurpaalutusohjeen mukaan tehollisen jännityksen laskennassa otetaan huomioon maan paino korkeintaan 10d tarkastelukohdasta ylöspäin. Julkaisussa Teräsputkipaalut ei tällaista rajoitusta ole. Taulukossa on myös huomioitu Teräsputkipaalut ohjeen 0,15 MPa rajoitus vaippavastukselle.

Taulukko 4. Vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain.

Teräsputkipaalut ohjeen mukaan							SPO:n mukaan			
Maakerros	$\phi$	$K_s$	$\sigma_v'$	$0,7 \tan \phi$	$f_s$	Vaippa- kantavuus	$\sigma_v'$	$K_s \tan \phi_a$	$f_s$	Vaippa- kantavuus
			(kN/m2)		(kN/m2)	(kN)	(kN/m2)		(kN/m2)	(kN)
Kerros A	-	-	18,75	-	-	-	18,75	-	-	-
Kerros B	-	-	57,5	-	-	-	57,5	-	-	-
Kerros C	30	0,78	100,9	0,40415	31,81	527,97	100,9	0,19	19,17	318,18
Kerros D	34	1,2	136,4	0,47216	77,28	542,67	89,78	0,37	33,22	233,27
Kerros E	40	2,3	153,8	0,58737	150	406,96	94,99	0,85	80,74	219,05

Kokonaisvaippakantavuus Teräsputkipaalut ohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 527,97 + 542,67 + 406,96 = 1477,60 \text{ kN}$$

Kokonaisvaippakantavuus Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 318,18 + 233,27 + 219,05 = 770,50 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma Teräsputkipaalut ohjeen mukaan:

$$P_u = 6677,938 + 1477,60 = 8156 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$P_u = 6677,938 + 770,50 = 7448 \text{ kN}$$

## 4.2 Kairausvastukseen perustuva menetelmä

Kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä lasketaan paalun murtokuorma julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Ohjeen Teräsputkipaalut mukaan paalun kärkivastuksen rajoittava arvo on 20 MPa vaippavastuksen rajoittavan arvon ollessa 0,15 MPa.

Kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Keskimääräinen heijarikairausvastus (lyöntiä/0,2m):

Keskimääräinen heijarikairausvastus otetaan alkaen 5d paalun kärjen yläpuolelta syvyyteen 3d kärjen alapuolelle.

$$5d = 5,08 \text{ m}$$

$$3d = 3,048 \text{ m}$$

$$\frac{0,8 \cdot 6 + 1,2 \cdot (14 + 60) + 0,4 \cdot (424 + 80) + 0,2 \cdot 112 + 1,3 \cdot 222 + 2,6 \cdot 624}{8,1} = 254$$

Kärkivastus:

$$\Rightarrow q_p = 20 \text{ MPa} = 20\,000 \text{ kN/m}^2$$

Kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,016}{2} \right)^2 \cdot 20000 = 16214,63 \text{ kN}$$

Taulukossa 5 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan.

Taulukko 5. Vaippakantavuuden laskeminen.

Teräsputkipaalut ohjeen mukaan				SPO:n mukaan	
Maakerros	Keskimäär. lyöntivastus (l/0,2m)	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippa- kantavuus (kN)	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippa- kantavuus (kN)
Kerros A	-	-	-	-	-
Kerros B	-	-	-	-	-
Kerros C	7	20	331,95	20	331,95
Kerros D	88	130	912,87	130	912,87
Kerros E	222	150	406,96	150	406,96



Kokonaisvaippakantavuus Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 331,95 + 912,87 + 406,96 = 1651,78 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$P_u = 16214,63 + 1651,78 = 17866 \text{ kN}$$

#### 4.3 Dynaamisiin paalutuskavoihin perustuvat menetelmät

Teräsputkipaalun murtokuorma lasketaan dynaamisiin paalutuskavoihin perustuvilla menetelmillä. Paalun painuman ja jouston summa oli 32,5 mm ja paaluun siirtynyt energia 245 kNm dynaamisten koekuormitusten perusteella. Paalun kyljestä mitattu painuma oli 2,5 mm, jolloin paalun jousto oli 30 mm. Pudotusjätkälleen paino oli 115 kN. Teräksen kimmokerroin on  $2,1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$  ja paalun teräspoikkileikkausala  $0,0347 \text{ m}^2$ . Paalun murtokuorma lasketaan seuraavilla dynaamisilla paalutuskavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{sAE_p}{L} + \sqrt{\frac{2wHAE_p}{L} + \left(\frac{sAE_p}{L}\right)^2}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + (C_1 + C_2 + C_3) / 2} \cdot \frac{w + n^2 w_p}{w + w_p}$$

Janbu (vanha):

$$P_u = \frac{wH}{k_u s}$$

$$k_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda_e / C_d})$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 w_p / w$$

$$\lambda_e = \frac{wHL}{AE_p s^2}$$

Danish:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + \sqrt{e_f wHL / 2AE_p}}$$

Gates:

$$P_u = 96 \sqrt{e_f w H} (2,4 - \log s)$$

missä

- $s$  on paalun painuma,
- $A$  on paalun poikkileikkausala,
- $E_p$  on paalun kimmokerroin,
- $L$  on paalun pituus,
- $C_1$  on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmainen muodonmuutos (0-5 mm),
- $C_2$  on paalun kimmainen muodonmuutos,
- $C_3$  on maan kimmainen muodonmuutos,
- $w_p$  on paalun paino ja
- $w$  on järkäleen paino.

Hiley'n, Danish ja Gates'in dynaamisiin paalutuskäyttöihin sijoitetaan todellinen paaluun siirtynyt energia järkäleen tehokkuuskertoimen  $e_f$ , lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalle. Hiley'n kaavassa myös kaavan jälkimmäinen osa  $((w+n^2 w_p)/(w+w_p))$ , joka kuvaa iskun tehokkuutta, jätetään kaavasta pois, kun käytetään dynaamisella koekuormituksella mitattua todellista paaluun siirtynyttä energiaa. Janbu'n sekä Weisbach'in paalutuskäytöissä käytetään todellista paaluun siirtynyttä energiaa lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalla. Hiley'n kaavassa iskutyynyn ja paalun yläpään kimmoisen muodonmuutoksen arvona käytetään 2 mm sekä paalun ja maan kimmoisen muodonmuutosten summana paalun joustoa, joka oli 30 mm.

Tuen G teräsputken pituus koekuormitushetkellä on 18,47 m. Putken massa on 273 kg/m. Kalliokärjen paino on 10,7 kN. Paalua upotettaessa varressa on betonia n. 1,0 m. Teräsputkipaalun paino koekuormitushetkellä on (ennen varren betonointia):

$$w_p = 18,47 \cdot 273 \cdot 9,81 / 1000 + 10,7 + \left(\frac{1,016}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 1,0 \cdot 25 = 80,4 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma lasketaan edellä mainituilla kaavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{0,0025 \cdot 0,03473 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{18,47} + \sqrt{\frac{2 \cdot 245 \cdot 0,03473 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{18,47} + \left(\frac{0,0025 \cdot 0,03473 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{18,47}\right)^2}$$

$$= 12958 \text{ kN}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{245}{0,0025 + (0,002 + 0,030) / 2} = 13243 \text{ kN}$$

Janbu (vanha):

$$\lambda_e = \frac{245 \cdot 18,47}{0,03473 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 0,0025^2} = 99,2716$$
$$C_d = 0,75 + 0,15 \cdot 80,4 / 115 = 0,8549$$
$$k_u = 0,8549(1 + \sqrt{1 + 99,2716 / 0,8549}) = 10,1066$$
$$P_u = \frac{245}{10,1066 \cdot 0,0025} = 9697 \text{ kN}$$

Danish:

$$P_u = \frac{245}{0,0025 + \sqrt{245 \cdot 18,47 / 2 \cdot 0,03473 \cdot 2,1 \cdot 10^8}} = 12181 \text{ kN}$$

Gates:

$$P_u = 96\sqrt{245}(2,4 - \log 0,0025) = 7516 \text{ kN}$$

Teräsputkipaalun murtokuormat, jotka on laskettu erilaisilla dynaamisilla paalutuskaavoilla on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Teräsputkipaalun murtokuorma dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuen.

	Weisbach	Hiley	Janbu (vanha)	Danish	Gates
Murtokuorma (kN)	12958	13243	9697	12181	7516

4.4 Dynaamisten koekuormitusten tulokset

Sillasta on koekuormitettu kolme paalua. Samanlaisten teräsputkipaalujen kokonaismäärä on kahdeksan. Koekuormitusten tulokset ovat 10 800, 13 200 ja 11 500 kN. Tuen G vasemman paalun koekuormituksessa tapahtui paalun yläpään tyssäytyminen, eikä koekuormituksia voitu jatkaa. Todennäköisesti paalun koko vastus ei mobilisoitunut ennen paalun yläpään tyssäytymistä. Laskuissa käytetään kuitenkin koekuormituksen antamia murtokuormien arvoja. Koekuormitustulosten keskiarvo on 11 833 kN ja alin arvo 10 800 kN.

5. Laskentaesimerkin tulokset

Seuraavissa taulukoissa on esitetty eri ohjejärjestelmien mukaan lasketut paalun geotekniset kantavuudet, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut eri laskentamenetelmiin perustuen. Mitoitusvarmuusluku on paalun geoteknisen kantavuuden ja mitoituskuorman suhde.

Tielaitoksen sallittujen jännitysten mukaiselle mitoitus tapaukselle TIEL-sall paalun geotekninen kantavuus lasketaan jakamalla paalun murtokuorma kokonaisvarmuusluvulla. Dynaamisiin koekuormituksiin perustuvan menetelmän kokonaisvarmuusluku on 2. Muilla menetelmillä kokonaisvarmuusluku on 2,5-3,0. Saatua geoteknista kantavuutta verrataan paalun mitoituskuormaan.



Rajatilamenetelmän mukaisilla mitoituksilla paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla. Kaikkien rajatilamitoitusten mukainen osavarmuusluku lyöntipaaluille on 1,3. Paalun kantavuuden ominaisarvo saadaan jakamalla paalun murtokuorma  $\xi$ - kertoimella. Kertoimen valinta riippuu käytetystä ohjejärjestelmästä ja mitoitusmenetelmästä.

Taulukoissa 7 ja 8 on esitetty staattisen kantavuuskaavan antamat tulokset eri ohjejärjestelmille. Taulukossa 7 on esitetty teräsputkipaalun mitoitus, kun paalun murtokuorma on laskettu julkaisun Teräsputkipaalut mukaan ja taulukossa 8, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan. Kaikkien taulukkojen ensimmäisen mitoitusastapauksen, joka on tielaitoksen sallittujen jännitysten mukainen mitoitus, kokonaisvarmuusluku on huomioitu kantavuuden arvossa. Sallittujen jännitysten menetelmällä kantavuus saadaan kahden geoteknisen kantavuusarvon välinä, koska menetelmän mukainen kokonaisvarmuusluku on 2,5-3,0.

*Taulukko 7.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Teräsputkipaalut ohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staatinnen kantavuuskaava								
- murtokuorma	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156
- kantavuuden omin.arvo	-	5098	5437	5437	5437	5437	5098	5098
- geotekninen kantavuus	2719-3262	3921	4183	4183	4183	4183	3921	3921
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,49-0,59	0,64	0,56	0,56	0,54	0,68	0,54	0,64

*Taulukko 8.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staatinnen kantavuuskaava								
- murtokuorma	7448	7448	7448	7448	7448	7448	7448	7448
- kantavuuden omin.arvo	-	4655	4965	4965	4965	4965	4655	4655
- geotekninen kantavuus	2483-2979	3581	3819	3819	3819	3819	3581	3581
Laskentakuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,45-0,53	0,59	0,51	0,51	0,49	0,63	0,50	0,59

Taulukoista 7 ja 8 huomataan, että tielaitoksen ohjeen mukainen mitoitus TIEL-rajat antaa aivan saman tuloksen kuin mitoitusstapaus Euro 1-1 NAD C. Kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan, staattiseen kantavuuskaavaan perustuvat mitoitusantavat mitoitusvarmuusluvulle hieman pienempiä arvoja kuin julkaisun Teräspuutkipaalut mukaan, koska Suurpaalutusohje antaa vaippakantavuudelle pienemmän arvon kuin julkaisu Teräspuutkipaalut.

Taulukossa 9 on esitetty kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamat laskentatulokset teräspuutkipaalulle. Kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä julkaisujen Teräspuutkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan lasketut paalun murtokuorman arvot ovat samat, joten tulokset on esitetty samassa taulukossa.

**Taulukko 9.** Teräspuutkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu julkaisujen Teräspuutkipaalut tai Suurpaalutusohje mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kair.vastukseen per. men.								
- murtokuorma	17866	17866	17866	17866	17866	17866	17866	17866
- kantavuuden omin.arvo	-	11166	11911	11911	11911	11911	11166	11166
- geotekninen kantavuus	5955-7146	8589	9162	9162	9162	9162	8589	8589
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	1,07-1,28	1,41	1,22	1,22	1,18	1,50	1,19	1,41

Taulukoissa 10, 11, 12, 13 ja 14 on esitetty dynaamisten paalutuskäyttöjen perusteella lasketut paalun kantavuuden arvot, paalun mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut eri ohjejärjestelmien ja eri paalutuskäyttöjen mukaan. Taulukossa 10 on esitetty teräspuutkipaalun mitoitus Weisbach'in, dynaamisella paalutuskäytöllä.

**Taulukko 10.** Teräspuutkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Weisbach'in dynaamisen paalutuskäytön perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Weisbach								
- murtokuorma	12958	12958	12958	12958	12958	12958	12958	12958
- kantavuuden omin.arvo	-	8099	8639	8639	8639	8639	8099	8099
- geotekninen kantavuus	4319-5183	6230	6645	6645	6645	6645	6230	6230
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,77-0,93	1,02	0,88	0,88	0,85	1,09	0,86	1,02

Taulukoissa 11, 12 ja 13 on esitetty teräsputkipaalun mitoitus Hiley'n, Janbu'n ja Danish dynaamisilla paalutuskaavoilla.

*Taulukko 11.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Hiley'n dynaamisen paalutuskaavan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Hiley								
- murtokuorma	13243	13243	13243	13243	13243	13243	13243	13243
- kantavuuden omin.arvo	-	8277	8829	8829	8829	8829	8277	8277
- geotekninen kantavuus	4414-5297	6367	6791	6791	6791	6791	6367	6367
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,79-0,95	1,04	0,90	0,90	0,87	1,11	0,88	1,04

*Taulukko 12.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Janbu'n dynaamisen paalutuskaavan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Janbu (vanha)								
- murtokuorma	9597	9597	9597	9597	9597	9597	9597	9597
- kantavuuden omin.arvo	-	6061	6465	6465	6465	6465	6061	6061
- geotekninen kantavuus	3232-3879	4662	4973	4973	4973	4973	4662	4662
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,58-0,70	0,76	0,66	0,66	0,64	0,81	0,65	0,76

*Taulukko 13.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Danish dynaamisen paalutuskaavan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Danish								
- murtokuorma	12181	12181	12181	12181	12181	12181	12181	12181
- kantavuuden omin.arvo	-	7613	8121	8121	8121	8121	7613	7613
- geotekninen kantavuus	4060-4872	5856	6247	6247	6247	6247	5856	5856
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,73-0,87	0,96	0,83	0,83	0,80	1,02	0,81	0,96



Taulukossa 14 on esitetty teräsputkipaalun mitoitus Gates'in, dynaamisella paalutuskavalla.

**Taulukko 14.** Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Gates'in dynaamisen paalutuskavvan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Gates								
- murtokuorma	7516	7516	7516	7516	7516	7516	7516	7516
- kantavuuden omin.arvo	-	4698	5011	5011	5011	5011	4698	4698
- geotekninen kantavuus	2505-3006	3613	3854	3854	3854	3854	3613	3613
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,45-0,54	0,59	0,51	0,51	0,49	0,63	0,50	0,59

Taulukoiden 10, 11, 12, 13 ja 14 mukaan dynaamisten paalutuskavojen perusteella lasketut mitoitusvarmuuslukujen arvot riippuvat paalutuskavasta. Hiley'n kaava antaa korkeimmat ja Gates'in kaava alimmat arvot mitoitusvarmuusluville. Jokaisella paalutuskavalla tielaitoksen mitoitusapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluvun antamien raja-arvojen väliin mahtuvat eurocode-ohjejärjestelmän mukaan lasketut mitoittavien tapausten B mitoitusvarmuusluvut. Mitoitustapaus TIEL-rajat antaa korkeampia arvoja mitoitusvarmuusluvulle kuin tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmä ja eurocodien mukaiset mitoittavat tapaukset B.

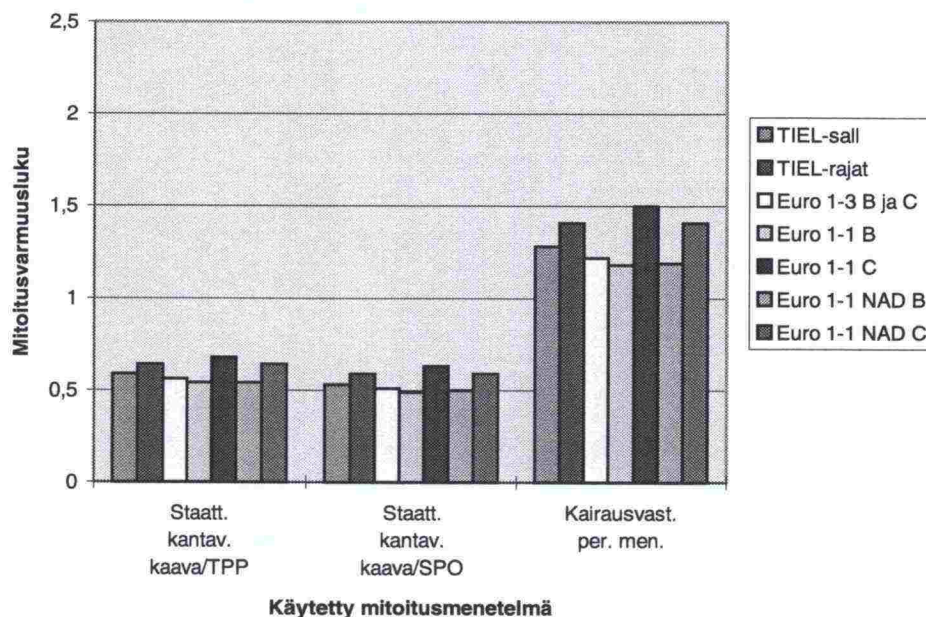
Taulukossa 15 on esitetty teräsputkipaalujen dynaamisten koekuormitusten perusteella lasketut kantavuuden arvot sekä mitoitusvarmuusluvut eri ohjejärjestelmien mukaan. Rajatilamitoituksessa geoteknisen kantavuuden ominaisarvolle saadaan kaksi arvoa. Toinen lasketaan käyttämällä koekuormitustulosten alinta arvoa, toinen käyttäen tulosten keskiarvoa. Kantavuuden ominaisarvo on näistä arvoista pienempi. Lopullinen geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla, joka on 1,3 lyöntipaaluille kaikkien ohjejärjestelmien mukaisissa rajatilamitoituksissa.

**Taulukko 15.** Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku dynaamisten koekuormitustulosten mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Dynaaminen koekuormitus								
- murtokuorma	10800	10800/11833	10800/11833	10800/11833	10800/11833	10800/11833	10800/11833	10800/11833
- kantavuuden omin.arvo	-	8308/8452	9818/9102	9818/9102	9818/9102	9818/9102	8308/8452	8308/8452
- geotekninen kantavuus	5400	6391	7002	7002	7002	7002	6391	6391
Mitoituskuorma	5576	6111	7528	7528	7795	6111	7226	6111
Mitoitusvarmuusluku	0,97	1,05	0,93	0,93	0,90	1,15	0,88	1,05

Kuvassa 2 on esitetty staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvien menetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut ohjejärjestelmittäin. Staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä paalun murtokuorma laskettiin julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä molempien ohjeiden mukaan lasketut murtokuormat olivat samat.

Kuvassa 2 on esitetty kaikkien ohjejärjestelmien antamat tulokset. Kuvassa esiintyvä tielaitoksen tapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluku vastaa kokonaisvarmuuslukua 2,5. Kuvasta huomataan, että eurocode-mitoituksista tapaus B antaa pienemmän mitoitusvarmuusluvun kuin tapaus C. Tapaukset TIEL-rajat ja Euro 1-1 NAD C antavat aina saman arvon mitoitusvarmuusluvulle mitoitusmenetelmittäin.

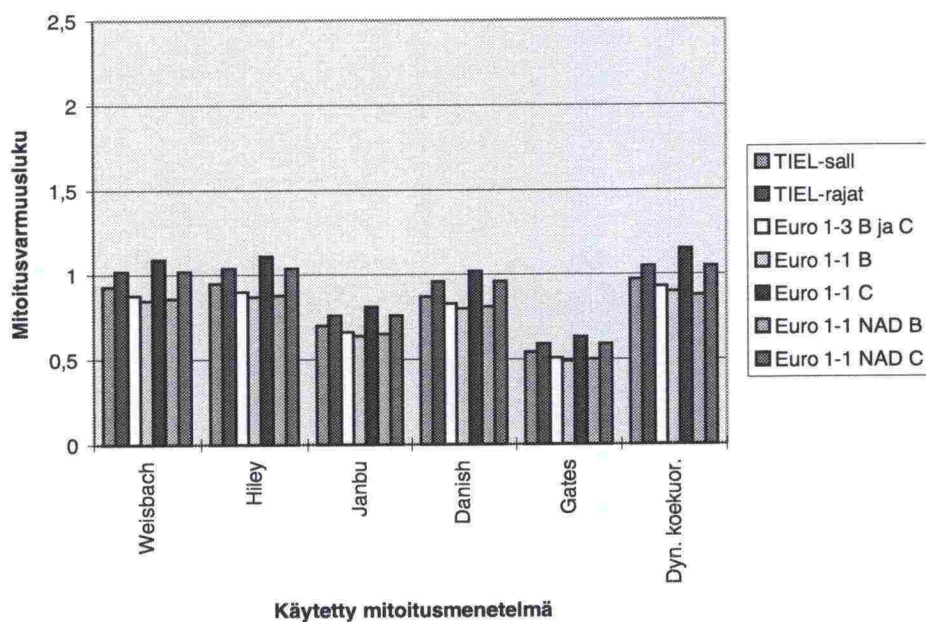


Kuva 2. Laskentaesimerkin tulokset staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä.

Staattiseen kantavuuskaavaan perustuvat menetelmät antavat kantavuuden ja laskenta-kuorman suhteelle varovaisia arvoja. Paalun geoteknisen kantavuus on rajoitettu kantavuuteen, jonka  $40^\circ$  kitkakulma antaa, koska julkaisun Teräsputkipaalut mukaisia kolmiakselikokeita laboratoriossa tai in-situ kokeita ei ole tehty.

Kuvassa 3 on esitetty suljetun teräsputkipaalun laskentatulokset, jotka perustuvat dynaamisiin paalutuskäyttöihin ja dynaamisiin koekuormituksiin.





Kuva 3. Laskentaesimerkin tulokset dynaamisiin paalutuskäyttöihin ja dynaamisiin koekuormitukseen perustuvilla menetelmillä.

Kuvista 2 ja 3 huomataan, että eri ohjejärjestelmien mukaiset arvot poikkeavat huomattavasti vähemmän toisistaan kuin eri mitoitusmenetelmiin perustuvat arvot. Tämän laskentaesimerkin perusteella kairausvastukseen perustuva menetelmä antaa suurimman kantavuuden paalulle. Weisbach'in, Hiley'n ja Danish dynaamisilla paalutuskäyttöillä saadaan tuloksia, jotka ovat hyvin lähellä dynaamisten koekuormitusten antamia tuloksia, kun paalutuskäytössä käytetään paaluun siirtynyttä todellista energiaa, joka saadaan dynaamisten koekuormitusten tuloksista.



## LASKENTAESIMERKKI 4. Kutujoen silta Kaivin- ja teräsputkipaaluvalvaihtoehdot, tuki 2 paalu K4

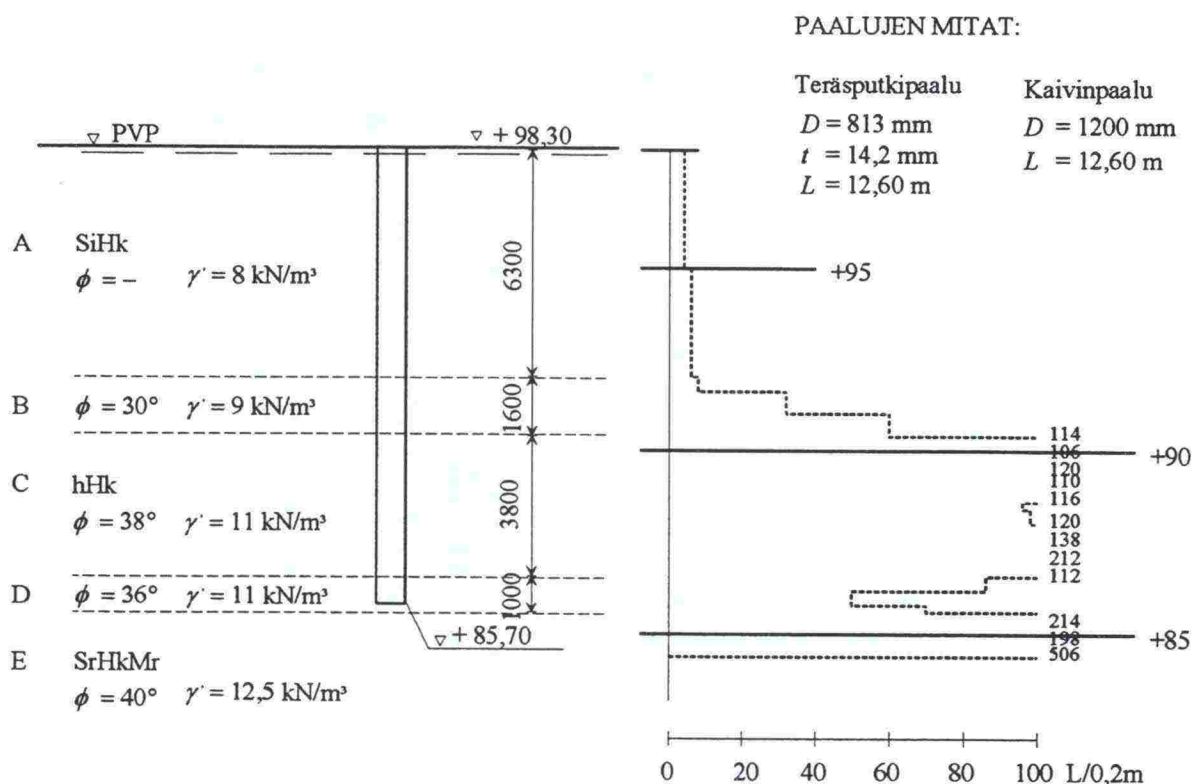
### 1 Käytettävät ohjejärjestelmät

Kutujoen sillan paalun K4 kantavuuslaskelmat tehdään teräsputkipaalu- ja kaivinpaaluvaihtoehdoille. Todellinen silta on perustettu suljetuilla teräsputkipaaluilla. Teräsputkipaaluvalvaihtoehdon laskelmat tehdään neljän mitoitusmenetelmän mukaan. Teräsputkipaaluun mitoituksessa käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusmenetelmät on esitetty laskentaesimerkissä 3.

Kaivinpaaluvalvaihtoehdon laskelmat tehdään kahden mitoitusmenetelmän mukaan. Käytettävät menetelmät ovat staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvat menetelmät. Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa Luvun 10 tarkistuksen mukaan kitkapaaluna toimivan moreeniin tukeutuvan kaivinpaaluun mitoitus tehdään rajatilamenetelmällä. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan paaluun mitoitus tehdään murtorajatilassa. Kaivinpaaluun murtokuorma lasketaan Suurpaalutusohjeen mukaan.

### 2 Maaperätiedot ja paalun mitat

Kuvassa 1 on esitetty maaperätiedot, heijarikairausdiagrammi sekä teräsputki- ja kaivinpaaluun mitat. Suljetussa teräsputkipaaluissa on kalliokärki. Teräsputkipaalu on upotettu Franki-paalutusmenetelmällä. Upotuksen jälkeen teräsputkipaalu on betonoitu.



Kuva 1. Maaperätiedot ja paalun mitat.

### 3 Paalun kuormat

Tuen 2 teräsputki- ja kaivinpaaluvaihtoehtojen mitoituskuormat lasketaan eri ohjejärjestelmien mukaan. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan paalun mitoitus tehdään tapauksille B ja C.

#### 3.1 Teräsputkipaaluvaihtoehto

Teräsputkipaaluvaihtoehtoon laskennassa käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusluokat ovat samat kuin laskentaesimerkissä 3. Kuormat yhdistetään laskentaesimerkin 3 mukaan. Teräsputkipaaluun ominaiskuormat ja erilaisten ohjejärjestelmien mukaiset osavarmuusluvut ja mitoituskuormat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Yhteenveto teräsputkipaalun kuormista, ohjejärjestelmien mukaiset kuormien osavarmuusluvut ja mitoituskuormat.

Kuormat		Kuormien osavarmuusluvut							
	V (kN)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat									
Kuorma kannelta	2803	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Pilari	115	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Paalu	182	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat									
Liikennekuorma	1351	1	1,3	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Mitoituskuorma (kN)		4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856

#### 3.2 Kaivinpaaluvaihtoehto

Kaivinpaaluvaihtoehtoon lasketaan seitsemän mitoitusluokasta. Kaivinpaaluvaihtoehtoa ei mitoiteta sallittujen jännitysten menetelmällä, koska tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan kitkapaaluna toimivan kaivinpaalun mitoitus tehdään rajatila-menetelmällä. Mitoitusluokista käytetään lyhenteitä TIEL-rajat, Euro 1-3 B ja C, Euro 1-1 B ja C sekä Euro 1-1 NAD B ja C.

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan paalun mitoituskuorma saadaan siten, että pysyvät kuormat otetaan ominaiskuorman suuruksina ja määräävä muuttuva kuorma 1,3-kertaisena. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisissa mitoituksissa kuormat kerrotaan ohjeiden mukaisilla osavarmuusluvuilla. Muuttuvia kuormia on vain yksi, jolloin se on määräävä muuttuva kuorma, jota ei kerrota muuttuvan kuorman yhdistelmäarvon kertoimella.

Kaivinpaalun oma paino on 396 kN. Muut ominaiskuormat ovat samat kuin teräsputkipaalun ominaiskuormat. Taulukossa 2 on esitetty kaivinpaalun K4 ominaiskuormat sekä ohjejärjestelmien mukaiset mitoituskuormat.



**Taulukko 2.** Yhteenveto kaivinpaalun kuormista, ohjejärjestelmien mukaiset kuormien osavarmuusluvut ja mitoituskuormat.

Kuormat		Kuormien osavarmuusluvut						
	V (kN)	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat								
Kuorma kannelta	2803	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Pilari	115	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Paalu	396	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat								
Liikennekuorma	1351	1,3	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Mitoituskuorma (kN)		5070	6298	6298	6500	5070	6003	5070

## 4 Paalun kantavuus

### 4.1 Teräspuutkipaalun kantavuus

Teräspuutkipaalun geotekninen kantavuus lasketaan laskentaesimerkin 3 mukaan. Paalun kantavuus lasketaan neljän erilaisen menetelmän mukaan. Käytettäviä menetelmiä ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvat menetelmät. Staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvien menetelmien mukaiset paalun murtokuormat lasketaan julkaisujen Teräspuutkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan.

Tielaitoksen ohjeisiin perustuva mitoituslaskenta TIEL-sall lasketaan sallittujen jännitysten menetelmällä. Geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun murtokuorma kokonaisvarmuusluvulla. Muut mitoituslaskennat lasketaan rajatilamenetelmällä. Rajatilamitoituksessa kaikkien ohjejärjestelmien mukaan teräspuutkipaalun kärki- ja vaippakantavuuden osavarmuusluvut ovat 1,3. Kantokyvyn ominaisarvo saadaan jakamalla paalun murtokuorma  $\xi$ -kertoimella. Eri mitoituslaskennalle  $\xi$ -kerroin valitaan laskentaesimerkin 3 mukaan.

#### 4.1.1 Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva mitoitus

Paalun kärki- ja vaippakantavuus lasketaan julkaisujen Teräspuutkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Julkaisun Teräspuutkipaalut mukaan paalun kärkivastuksen rajoittava arvo on 20 MPa vaippavastuksen rajoittavan arvon ollessa 0,15 MPa. Kärki- ja vaippakantavuuden summa antaa paalun murtokuorman. Kaikille mitoituslaskennalle saadaan sama murtokuorma, josta lasketaan geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo jokaisen ohjejärjestelmän mukaan.

Staattinen kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$



Kärkivastus:

$$q_p = \sigma_{vp}' N_q$$

$$10d = 8,13 \text{ m}$$

$$\sigma_{vp} = 1,83 \cdot 8 + 1,6 \cdot 9 + 3,8 \cdot 11 + 0,9 \cdot 11 = 80,74 \text{ kN/m}^2$$

Keskimääräinen kitkakulma paalun kärjessä:

$$5d = 4,065 \text{ m}$$

$$3d = 2,439 \text{ m}$$

$$\phi = \frac{0,9 \cdot 36 + 3,165 \cdot 38 + 0,1 \cdot 36 + 2,339 \cdot 40}{4,065 + 2,439} = 38,4^\circ$$

$$\Rightarrow N_q = 130$$

$$q_p = 80,74 \cdot 130 = 10496,20 \text{ kN/m}^2$$

Teräsputkipaalun kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{0,813}{2} \right)^2 \cdot 10496,20 = 5448,83 \text{ kN}$$

Vaippavastus:

$$f_s = K_s \sigma_{v'}' \tan \phi_a$$

Taulukossa 3 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen maakerroksittain julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan. Taulukon 3 mukaiset kertoimet  $K_s$  ja  $K_s \tan \phi_a$  saadaan ohjeiden mitoituskäyrästä. Vaippakantavuus lasketaan maakerrokselle, jonka kitkakulma on vakio. Paalun kokonaisvaippakantavuus saadaan laskemalla kerrosten vaippakantavuudet yhteen.

Taulukko 3. Vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain.

Teräsputkipaalut ohjeen mukaan								SPO:n mukaan		
Maakerros	$\phi$	$K_s$	$\sigma_{v'}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$0,7 \tan \phi$	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippa- kantavuus (kN)	$\sigma_{v'}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_s \tan \phi_a$	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippa- kantavuus (kN)
Kerros A	-	-	25,2	-	-	-	25,2	-	-	-
Kerros B	30	0,78	57,6	0,40415	18,16	74,21	57,6	0,19	10,94	44,71
Kerros C	38	1,8	85,7	0,54690	84,36	818,77	72,34	0,62	44,85	435,30
Kerros D	36	1,6	111,6	0,50858	90,77	208,65	79,39	0,44	34,93	80,29

Teräsputkipaalun kokonaisvaippakantavuus julkaisun Teräsputkipaalut mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 74,21 + 818,77 + 208,65 = 1101,63 \text{ kN}$$

Teräsputkipaalun kokonaisvaippakantavuus Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 44,71 + 435,30 + 80,29 = 560,30 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma julkaisun Teräsputkipaalut mukaan:

$$P_u = 5445,048 + 1101,63 = 6547 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$P_u = 5445,048 + 560,30 = 6005 \text{ kN}$$

#### 4.1.2 Kairausvastukseen perustuva menetelmä

Lasketaan teräsputkipaalun murtokuorma kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä.

Kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Keskimääräinen heijarikairausvastus paalun kärjessä:

$$5d = 4,065 \text{ m}$$

$$3d = 2,439 \text{ m}$$

$$\frac{0,2 \cdot 70 + 0,4 \cdot (50 + 86) + 1,4 \cdot 157 + 0,6 \cdot 96 + 1,065 \cdot 115 + 1,2 \cdot 206 + 1,239 \cdot 506}{4,065 + 2,439}$$

$$= 206 \text{ l/0,2m}$$

Kärkivastus:

$$\Rightarrow q_p = 20 \text{ MPa} = 20\,000 \text{ kN/m}^2$$

Teräsputkipaalun kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{0,813}{2} \right)^2 \cdot 20000 = 10382,48 \text{ kN}$$

Taulukossa 4 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan.

Taulukko 4. Vaippakantavuuden laskeminen.

Teräsputkipaalut ohjeen mukaan				SPO:n mukaan	
Maakerros	Keskimäär. lyöntivastus	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	4	-	-	-	-
Kerros B	37	80	326,93	80	326,93
Kerros C	127	150	1455,85	150	1455,85
Kerros D	68	100	229,87	100	229,87

Teräsputkipaalun kokonaisvaippakantavuus julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 326,93 + 1455,85 + 229,87 = 2012,65 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan:

$$P_u = 10382,48 + 2012,65 = 12395 \text{ kN}$$

#### 4.1.3 Dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuva menetelmä

Suljetun teräsputkipaalun murtokuorma lasketaan dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuvilla menetelmillä. Paalun painuman ja jouston summa oli 41,1 mm ja paaluun siirtynyt energia 343 kNm dynaamisten koekuormitusten perusteella. Paalun kyljestä mitattu painuma oli 3 mm, jolloin paalun jousto oli 38,1 mm. Pudotusjätkäleen paino oli 115 kN. Teräksen kimmo kerroin on  $2,1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$  ja paalun teräspoikkileikkausala  $0,0356 \text{ m}^2$ . Paalun murtokuorma lasketaan seuraavilla dynaamisilla paalutuskaavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{sAE_p}{L} + \sqrt{\frac{2wHAE_p}{L} + \left(\frac{sAE_p}{L}\right)^2}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{e_f w H}{s + (C_1 + C_2 + C_3) / 2} \cdot \frac{w + n^2 w_p}{w + w_p}$$



Janbu (vanha):

$$P_u = \frac{wH}{k_u s}$$

$$k_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda_e / C_d})$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 w_p / w$$

$$\lambda_e = \frac{wHL}{AE_p s^2}$$

Danish:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + \sqrt{e_f wHL / 2AE_p}}$$

Gates:

$$P_u = 96 \sqrt{e_f wH} (2,4 - \log s)$$

missä

$s$	on paalun painuma,
$A$	on paalun poikkileikkausala,
$E_p$	on paalun kimmokerroin,
$L$	on paalun pituus,
$C_1$	on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmainen muodonmuutos (0-5 mm),
$C_2$	on paalun kimmainen muodonmuutos,
$C_3$	on maan kimmainen muodonmuutos,
$w_p$	on paalun paino ja
$w$	on järkäleen paino.

Hiley'n, Danish ja Gates'in dynaamisiin paalutuskavoihin sijoitetaan todellinen paaluun siirtynyt energia järkäleen tehokkuuskertoimen  $e_f$  lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalle. Hiley'n kaavassa myös kaavan jälkimmäinen osa  $((w+n^2 w_p)/(w+w_p))$ , joka kuvaa iskun tehokkuutta, jätetään kaavasta pois, kun käytetään dynaamisella koekuormituksella mitattua todellista paaluun siirtynyttä energiaa. Janbu'n sekä Weisbach'in paalutuskavoiissa käytetään todellista paaluun siirtynyttä energiaa lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalla. Hiley'n kaavassa iskutyynyn ja paalun yläpään kimmoisen muodonmuutoksen arvona käytetään 2 mm sekä paalun ja maan kimmoisen muodonmuutosten summana paalun joustoa, joka oli 38,1 mm.

Tuen 2 teräsputken pituus koekuormitushetkellä on 14,70 m. Putken massa on 280 kg/m. Kalliokärjen paino on 6,4 kN. Paalua upotettaessa varressa on betonitulppa, jonka korkeus on n. 1,0 m. Teräsputkipaalun paino koekuormitushetkellä on (ennen varren betonointia):

$$w_p = 14,70 \cdot 280 \cdot 9,81 / 1000 + 6,4 + \left(\frac{0,813}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 1,0 \cdot 25 = 59,8 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma lasketaan edellä mainituilla kaavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{0,003 \cdot 0,035635 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{14,70} + \sqrt{\frac{2 \cdot 343 \cdot 0,035635 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{14,70} + \left(\frac{0,003 \cdot 0,035635 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{14,70}\right)^2}$$

$$= 17223 \text{ kN}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{343}{0,003 + (0,002 + 0,0381) / 2} = 14881 \text{ kN}$$

Janbu (vanha):

$$\lambda_e = \frac{343 \cdot 14,70}{0,035635 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 0,003^2} = 74,8640$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \cdot 59,8 / 115 = 0,828$$

$$k_u = 0,828 \cdot (1 + \sqrt{1 + 74,8640 / 0,828}) = 8,7446$$

$$P_u = \frac{343}{8,7446 \cdot 0,003} = 13075 \text{ kN}$$

Danish:

$$P_u = \frac{343}{0,003 + \sqrt{343 \cdot 14,70 / 2 \cdot 0,035635 \cdot 2,1 \cdot 10^8}} = 16062 \text{ kN}$$

Gates:

$$P_u = 96\sqrt{343(2,4 - \log 0,003)} = 8753 \text{ kN}$$

Teräspalkkipaalun murtokuormat, jotka on laskettu erilaisilla dynaamisilla paalutuskävoilla on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Suljetun teräspalkkipaalun murtokuorma dynaamisten paalutuskävojen perusteella.

	Weisbach	Hiley	Janbu (vanha)	Danish	Gates
Murtokuorma (kN)	17223	14881	13075	16062	8753

#### 4.1.4 Dynaamisten koekuormitusten tulokset

Kutujen sillasta on koekuormitettu kaksi välituen paalua. Samanlaisten teräspalkkipaalujen kokonaismäärä on neljä. Dynaamisten koekuormitusten antamat murtokuormat ovat 10 040 kN ja 10 720 kN. Koekuormitustulosten keskiarvo on 10 380 kN ja alin arvo 10 040 kN.

## 4.2 Kaivinpaalun kantavuus

Kaivinpaalun murtokuorma lasketaan Suurpaalutusohjeen mukaan. Kantavuus lasketaan kahdella erilaisella menetelmällä. Käytetyt menetelmät ovat staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvat menetelmät. Suurpaalutusohjeen, Eurocode 7 ja sen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan paalun geotekninen kantavuus saadaan jakamalla paalun kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla. Ohjeiden mukaan kaivinpaalujen vaippakantavuuden osavarmuusluku on 1,3 ja kärkikantavuuden osavarmuusluku on 1,6.

Kantavuuden ominaisarvo saadaan jakamalla murtokuorma  $\xi$ -kertoimella. Kertoimen arvo riippuu murtokuorman laskentatavasta ja käytetystä ohjejärjestelmästä. Suurpaalutusohjeen ja Eurocode 7 kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan kertoimen arvo on 1,6, jos murtokuorman laskenta perustuu pohjatutkimustuloksiin. Eurocode 7 mukaan vastaava arvo on 1,5.

Tielaitoksen ohjeen Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa mukaan rajatilamitoitusta käytettäessä kitkapaaluna toimivan kaivinpaalun kärjen poikkileikkausalan yksikköä kohti laskettu mitoituskantavuus saa olla enintään 7 MPa. Joten ohjeen mukaan kaivinpaalun, jonka halkaisija on 1200 mm, suurin mahdollinen kantavuuden mitoitusarvo on 7 917 kN.

### 4.2.1 Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva mitoitus

Kaivinpaalun kärki- ja vaippakantavuus lasketaan Suurpaalutusohjeen mukaan. Kärki- ja vaippakantavuuden summasta saadaan paalun murtokuorma.

Staattinen kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Kärkivastus:

$$q_p = \sigma_{vp} N_q \leq 20 \text{ MPa}$$

$$10d = 12,0 \text{ m}$$

$$\sigma_{vp} = 5,7 \cdot 8 + 1,6 \cdot 9 + 3,8 \cdot 11 + 0,9 \cdot 11 = 111,70 \text{ kN/m}^2$$

Keskimääräinen kitkakulma paalun kärjessä:

$$5d = 6,0 \text{ m}$$

$$3d = 3,6 \text{ m}$$

$$\phi = \frac{0,9 \cdot 36 + 3,8 \cdot 38 + 1,3 \cdot 30 + 0,1 \cdot 36 + 3,5 \cdot 40}{6,0 + 3,6} = 37,4^\circ$$



$$\Rightarrow N_q = 65$$

$$q_p = 111,70 \cdot 65 = 7260,5 \text{ kN/m}^2$$

Kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,20}{2} \right)^2 \cdot 7260,5 = 8211,43 \text{ kN}$$

Vaippavastus:

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \phi_a$$

Taulukossa 6 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen maakerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan. Taulukon 6 mukainen kerroin  $K_s \tan \phi_a$  saadaan ohjeen mitoituskäyrästä.

Taulukko 6. Vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain.

Maakerros	$\phi$	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_s \tan \phi_a$	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	25,2	-	-	-
Kerros B	30	57,6	0,32	18,43	111,17
Kerros C	38	85,7	0,54	46,28	662,99
Kerros D	36	110,35	0,76	83,87	284,56

Kokonaisvaippakantavuus:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 111,17 + 662,99 + 284,56 = 1058,72 \text{ kN}$$

Kaivinpaalun murtokuorma staattisella kantavuuskaavalla:

$$P_u = 8211,43 + 1058,72 = 9270 \text{ kN}$$

#### 4.2.2 Kairausvastukseen perustuva menetelmä

Kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Keskimääräinen heijarikairausvastus paalun kärjessä (l/0,2m):

$$5d = 6,0 \text{ m}$$

$$3d = 3,6 \text{ m}$$

$$\frac{0,2 \cdot 70 + 0,4 \cdot (50 + 86) + 1,4 \cdot 157 + 0,6 \cdot (96 + 60 + 32) + 1,8 \cdot 113 + 1,2 \cdot 206 + 2,4 \cdot 506}{6 + 3,6} = 215$$

Kärkivastus:

$$\Rightarrow q_p = 20 \text{ MPa} = 20\,000 \text{ kN/m}^2$$

Kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,20}{2} \right)^2 \cdot 20\,000 = 22\,619,47 \text{ kN}$$

Taulukossa 7 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan.

Taulukko 7. Vaippakantavuuden laskeminen.

Maakerros	Keskimäär. lyöntivastus	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	4	-	-
Kerros B	37	100	603,19
Kerros C	127	150	2148,85
Kerros D	68	120	407,15

Kokonaisvaippakantavuus:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 603,19 + 2148,85 + 407,15 = 3159,19 \text{ kN}$$

Kaivinpaalun murtokuorma kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä:

$$P_u = 22\,619,47 + 3159,19 = 25\,778,66 \text{ kN}$$

## 5. Laskentaesimerkin tulokset

Seuraavissa taulukoissa on esitetty eri ohjejärjestelmien mukaan lasketut paalun geotekniset kantavuudet, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut eri laskentamenetelmillä. Mitoitusvarmuusluku on paalun geoteknisen kantavuuden ja mitoituskuorman suhde.

Taulukoissa 8, 9 ja 10 on esitetty staattisen kantavuuskaavan antamat tulokset eri ohjejärjestelmille paalutypeittäin. Taulukossa 8 on esitetty teräspalkkipaalun mitoitusvarmuusluvun laskenta, kun paalun murtokuorma on laskettu julkaisun Teräspalkkipaalut mukaan. Taulukon 8 ensimmäisen mitoitusapauksen, joka on tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmä, kokonaisvarmuuskerroin on huomioitu kantavuuden arvossa. Sallittujen jännitysten menetelmällä kantavuus saadaan kahden geoteknisen kantavuusarvon välillä, koska menetelmän mukainen kokonaisvarmuuskerroin on 2,5-3,0.

**Taulukko 8.** Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Teräsputkipaalut ohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staattinen kantavuuskaava								
- murtokuorma	6547	6547	6547	6547	6547	6547	6547	6547
- kantavuuden omin.arvo	-	4092	4364	4364	4364	4364	4092	4092
- geotekninen kantavuus	2182-2619	3147	3357	3357	3357	3357	3147	3147
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	0,49-0,59	0,65	0,56	0,56	0,54	0,69	0,55	0,65

Taulukon 8 mukaan eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoituksista neljän viimeisen mitoitus tapauksen määräävä tapaus on tapaus B. Eurocodien mitoittavien tapauksien mitoitusvarmuuslukujen arvot ovat todella lähellä toisiaan. Eurocodien mukaiset mitoitukset antavat mitoitusvarmuusluville arvoja, jotka ovat tielaitoksen mitoitus tapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluvun antamien raja-arvojen keskivaiheilla.

Taulukossa 9 on esitetty teräsputkipaalun mitoitusvarmuuslukujen laskenta staattisen kantavuuskaavan perusteella, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

**Taulukko 9.** Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staattinen kantavuuskaava								
- murtokuorma	6005	6005	6005	6005	6005	6005	6005	6005
- kantavuuden omin.arvo	-	3753	4004	4004	4004	4004	3753	3753
- geotekninen kantavuus	2002-2402	2887	3080	3080	3080	3080	2887	2887
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	0,45-0,54	0,59	0,51	0,51	0,50	0,63	0,50	0,59

Taulukosta 9 huomataan, että tielaitoksen ohjeen mukainen mitoitus TIEL-rajat antaa aivan saman tuloksen kuin mitoitus tapaus Euro 1-1 NAD C. Kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan, eurocodien mukaiset mitoitukset antavat mitoitusvarmuusluville arvoja, jotka ovat hieman pienempiä kuin edellä.

Taulukossa 10 on esitetty kaivinpaalun mitoitusvarmuusluvun laskenta staattisen kantavuuskaavan perusteella, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.



**Taulukko 10.** Kaivinpaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staattinen kantavuuskaava							
- murtokuorma	9270	9270	9270	9270	9270	9270	9270
- kantavuuden omin.arvo	6180	5794	5794	5794	5794	6180	6180
- geotekninen kantavuus	3717	3964	3964	3964	3964	3717	3717
Mitoituskuorma	5070	6298	6298	6500	5070	6003	5070
Mitoitusvarmuusluku	0,73	0,63	0,63	0,61	0,78	0,62	0,73

Taulukossa 11 ja 12 on esitetty kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamat laskentatulokset teräsputki- ja kaivinpaalulle. Taulukossa 11 on esitetty teräsputkipaalun mitoitus tulokset, kun paalun murtokuorma on laskettu Teräsputkipaalut ohjeen tai Suurpaalutusohjeen mukaan.

**Taulukko 11.** Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Teräsputkipaalut ohjeen tai Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kairausvast. per. men.								
- murtokuorma	12395	12395	12395	12395	12395	12395	12395	12395
- kantavuuden omin.arvo	-	7747	8263	8263	8263	8263	7747	7747
- geotekninen kantavuus	4132-4958	5959	6356	6356	6356	6356	5959	5959
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	0,93-1,11	1,23	1,06	1,06	1,02	1,31	1,04	1,23

Taulukon 11 mukaan julkaisujen Teräsputkipaalut ja Suurpaalutusohje mukaan lasketut teräs-putkipaalun murtokuormat ovat aivan samat kairausvastukseen perustuvassa mitoitusmenetelmässä. Taulukoiden 8 ja 9 mukaan Teräsputkipaalut ohjeen ja Suurpaalutusohjeen mukaan lasketut staattiseen kantavuuskaavaan perustuvat murtokuormat eroavat toisistaan. Staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvassa menetelmässä murtokuorman laskennassa käytetään ohjeiden mitoituskäyrästöjä, joiden kuvaajat poikkeavat toisistaan vaippavastuksen laskennassa.

Taulukossa 12 on esitetty kaivinpaalun mitoitusvarmuusluvut kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

*Taulukko 12.* Kaivinpaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kair.vastukseen per. men							
- murtokuorma	25779	25779	25779	25779	25779	25779	25779
- kantavuuden omin.arvo	17186	16112	16112	16112	16112	17186	17186
- geotekninen kantavuus	10355	11045	11045	11045	11045	10355	10355
Mitoituskuorma	5070	6298	6298	6500	5070	6003	5070
Mitoitusvarmuusluku	2,04	1,75	1,75	1,70	2,18	1,72	2,04

Tielaitoksen ohjeessa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa annetaan kaivinpaalun mitoituskantavuuden raja-arvoksi 7 MPa. Taulukoista 12 huomataan, että kairausvastukseen perustuva mitoitusmenetelmä antaa kaivinpaalulle, jonka halkaisija on 1200 mm, huomattavasti suurempia kantavuuden arvoja kuin 7917 kN. Taulukossa 13 on esitetty kaivinpaalun mitoitus kairausvastukseen perustuvalla menetelmällä, kun julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa antamat rajoitukset on otettu huomioon.

*Taulukko 13.* Kaivinpaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan ja julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa antama mitoituskantavuuden rajoitus on otettu huomioon.

	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kair.vastukseen per. men							
- murtokuorma	25779	25779	25779	25779	25779	25779	25779
- kantavuuden omin.arvo	-	-	-	-	-	-	-
- geotekninen kantavuus	7917	7917	7917	7917	7917	7917	7917
Mitoituskuorma	5070	6298	6298	6500	5070	6003	5070
Mitoitusvarmuusluku	1,56	1,26	1,26	1,22	1,56	1,32	1,56

Taulukoissa 14, 15, 16, 17 ja 18 on esitetty dynaamisten paalutuskaavojen perusteella lasketut kantavuuden arvot, paalun mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut suljetulle teräsputkipaalulle eri ohjejärjestelmien ja paalutuskaavojen mukaan. Laskennassa on käytetty viittä erilaista dynaamista paalutuskaavaa. Paalutuskaavojen antamat murtokuormat vaihtelevat välillä 8753 - 17223 kN.

Taulukoissa 14, 15 ja 16 on esitetty teräsputkipaalun mitoitusvarmuuslukujen laskenta Weisbach'in, Hiley'n ja Janbu'n dynaamisten paalutускааvojen perusteella.

Taulukko 14. Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Weisbach'in dynaamisen paalutускааvan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Weisbach								
- murtokuorma	17233	17233	17233	17233	17233	17233	17233	17233
- kantavuuden omin.arvo	-	10771	11489	11489	11489	11489	10771	10771
- geotekninen kantavuus	5744-6893	8285	8837	8837	8837	8837	8285	8285
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	1,29-1,55	1,71	1,47	1,47	1,42	1,82	1,44	1,71

Taulukko 15. Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Hiley'n dynaamisen paalutускааvan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Hiley								
- murtokuorma	14881	14881	14881	14881	14881	14881	14881	14881
- kantavuuden omin.arvo	-	9301	9921	9921	9921	9921	9301	9301
- geotekninen kantavuus	4960-5952	7154	7631	7631	7631	7631	7154	7154
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	1,11-1,34	1,47	1,27	1,27	1,23	1,57	1,24	1,47

Taulukko 16. Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Janbu'n dynaamisen paalutускааvan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Janbu (vanha)								
- murtokuorma	13075	13075	13075	13075	13075	13075	13075	13075
- kantavuuden omin.arvo	-	8172	8717	8717	8717	8717	8172	8172
- geotekninen kantavuus	4358-5230	6286	6705	6705	6705	6705	6286	6286
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	0,98-1,18	1,29	1,12	1,12	1,08	1,38	1,09	1,29



Taulukoissa 17 ja 18 on esitetty teräsputkipaalun mitoitusvarmuuslukujen laskenta Danish ja Gates'in dynaamisten paalutuskäävojen perusteella.

*Taulukko 17.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Danish dynaamisen paalutuskäävan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Danish								
- murtokuorma	16062	16062	16062	16062	16062	16062	16062	16062
- kantavuuden omin.arvo	-	10039	10708	10708	10708	10708	10039	10039
- geotekninen kantavuus	5354-6425	7722	8237	8237	8237	8237	7722	7722
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	1,20-1,44	1,59	1,37	1,37	1,33	1,70	1,34	1,59

*Taulukko 18.* Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Gates'in dynaamisen paalutuskäävan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Gates								
- murtokuorma	8753	8753	8753	8753	8753	8753	8753	8753
- kantavuuden omin.arvo	-	5471	5835	5835	5835	5835	5471	5471
- geotekninen kantavuus	2918-3501	4208	4489	4489	4489	4489	4208	4208
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	0,66-0,79	0,87	0,75	0,75	0,72	0,92	0,73	0,87

Taulukoiden 14, 15, 16, 17 ja 18 mukaan dynaamisten paalutuskäävojen perusteella lasketut mitoitusvarmuuslukujen arvot riippuvat paalutuskäävasta sekä käytetystä ohjejärjestelmästä. Gates'n kääva antaa luvuille alhaisimmat arvot ja Weisbach'in kääva korkeimmat arvot. Jokaisella paalutuskäävalla tielaitoksen mitoitusapauksen TIEL-sall antamien mitoitusvarmuuslukujen raja-arvojen väliin mahtuvat eurocode-ohjejärjestelmän mukaan lasketut määräävien tapausten mitoitusvarmuusluvut. Mitoitustapaus TIEL-rajat antaa korkeampia arvoja mitoitusvarmuusluvulle kuin muut määräävät tapaukset.

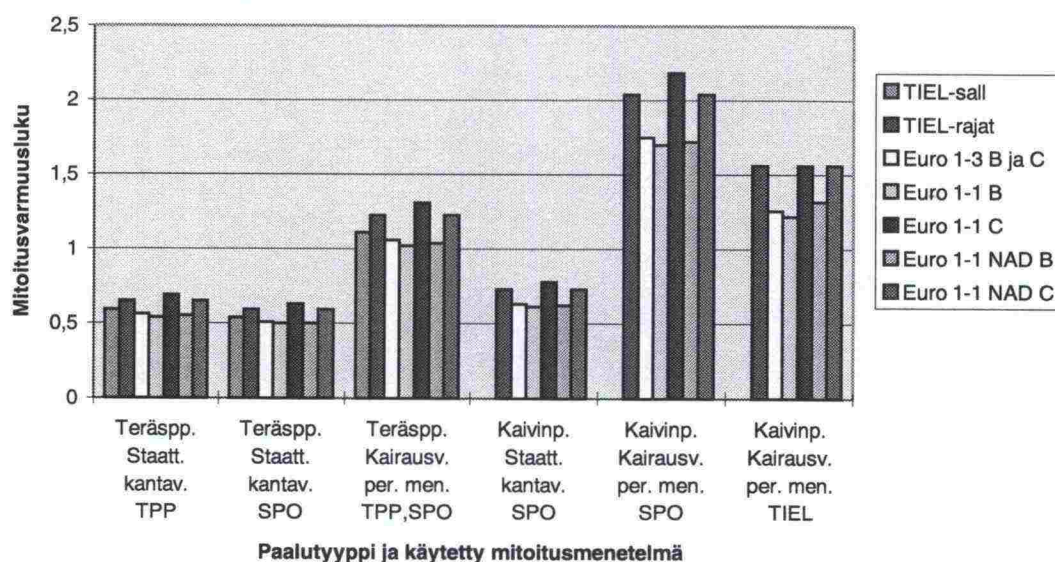
Taulukossa 19 on esitetty dynaamisten koekuormitusten perusteella lasketut kantavuuden arvot, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut suljetulle teräsputkipaalulle eri ohjejärjestelmien mukaan. Rajatilamitoituksessa geoteknisen kantavuuden ominaisarvolle saadaan kaksi arvoa. Toinen lasketaan käyttämällä koekuormitustulosten alinta arvoa, toinen käyttäen tulosten keskiarvoa. Kantavuuden ominaisarvo on näistä arvoista pienempi. Lopullinen geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla.

Taulukko 19. Teräsputkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku dynaamisten koeuormitustulosten perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Dynaaminen koeuormitus								
- murtokuorma	10040	10040/10380	10040/10380	10040/10380	10040/10380	10040/10380	10040/10380	10040/10380
- kantavuuden omin.arvo	-	8032/7689	8032/7689	8032/7689	8032/7689	8032/7689	8032/7689	8032/7689
- geotekninen kantavuus	5020	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915
Mitoituskuorma	4451	4856	6009	6009	6212	4856	5747	4856
Mitoitusvarmuusluku	1,13	1,22	0,98	0,98	0,95	1,22	1,03	1,22

Tämän laskentaesimerkin mukaan tielaitoksen rajatilamenetelmän mukainen mitoitus TIEL-rajat antaa aivan saman tuloksen kuin mitoistapaus Euro 1-1 NAD C kaikilla mitoitusmenetelmillä. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoituksista mitoistapaukset Euro 1-3 B ja C on tehty siltoja koskevien ohjeiden mukaan, joten mitoistapauksen vertailu kannattaa ensisijaisesti tehdä tapauksen Euro 1-3 B ja C sekä kansallisten ohjeiden mukaisten mitoistapauksen välillä.

Kuvassa 2 on esitetty maan lujuusparametreihin perustuvien menetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut teräsputki- ja kaivnippaalulle. Kuvan viimeinen pylväs esittää kaivnippaalun kairausvastukseen perustuvan mitoituksen tuloksia, jossa on huomioitu julkaisun Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa antama 7 MPa rajoitus mitoiskantavuudelle.

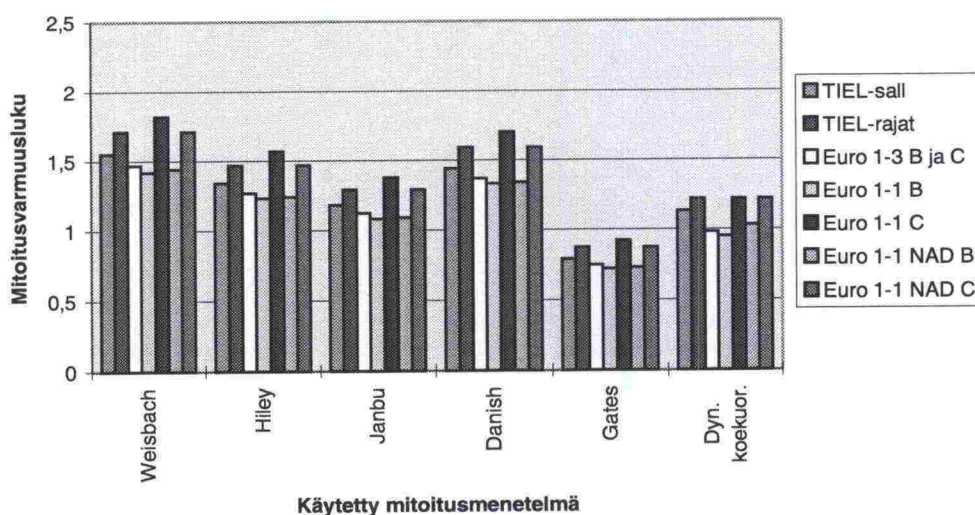


Kuva 2. Eri ohjejärjestelmien antamat mitoitusvarmuusluvut staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä suljetulle teräsputkipaalulle ( $d = 813$  mm) ja kaivnippaalulle ( $d = 1200$  mm).



Kuvasta 2 huomataan, että staattiseen kantavuuskaavaan perustuvat mitoitukset antavat paalun geotekniselle kapasiteetille rajoitetun arvon, joka vastaa kitkakulmaa  $40^\circ$ , koska julkaisun Teräsputkipaalut mukaisia kolmiaksaalikokeita laboratoriossa tai in-situ kokeita ei ole tehty.

Kuvassa 3 on esitetty energiataarkasteluihin perustuvien mitoitusmenetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut suljetulle teräsputkipaalulle.



Kuva 3. Eri ohjejärjestelmien antamat mitoitusvarmuusluvut dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvilla menetelmillä suljetulle teräsputkipaalulle.

Kuvista 2 ja 3 huomataan, että mitoitusmenetelmän valinnalla on suuri merkitys mitoitusvarmuusluvun antamaan arvoon. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoitus tapauksista tapaus B antaa aina pienimmän arvon mitoitusvarmuusluvulle, kun käytetään eurocodien yleisiä kuormitusohjeita. Eurocodien siltoja koskevien ohjeiden mukaan mitoitus tapaukset B ja C antavat saman tuloksen, koska ohjeessa Siltojen liikennekuormat kuormapuolella mitoitus tapaukset B ja C yhdistetään ja paalujen geoteknistä kantavuutta laskettaessa osavarmuusluvut ja  $\xi$ -kertoimet ovat samat tapauksille B ja C.



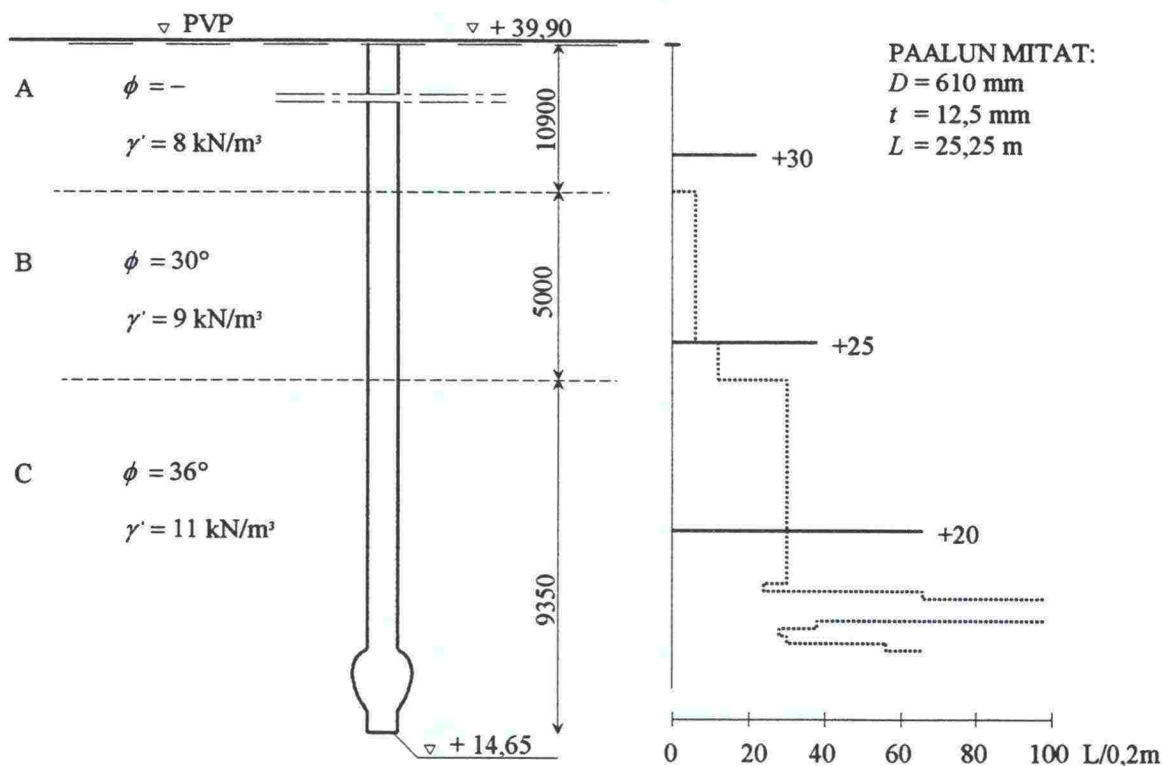
## LASKENTAESIMERKKI 5. Mikonkorven risteyssilta Sipulipaalu, tuki 1 paalu 1

### 1 Käytettävät ohjejärjestelmät

Mikonkorven risteyssillan tuen 1 paalun 1 kantavuuslaskelmat tehdään neljän mitoitusmenetelmän mukaan. Käytettävät mitoitusmenetelmät ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskäyriin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvat menetelmät. Sipulipaalun mitoituksessa käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusmenetelmät on esitetty laskentaesimerkissä 3.

### 2 Maaperätiedot ja paalun mitat

Kuvassa 1 on esitetty maaperätiedot, heijarikairausdiagrammi sekä sipulipaalun mitat. Sipulipaalut ovat aluslevyllä suljettuja teräspalkkipaaluja, jotka lyödään Franki-menetelmällä. Aluslevyn paksuus on 20 mm. Paalun varressa on heikennetty osa, jonka korkeus on 900 mm. Heikennyksen alapuolisen osan korkeus on 650 mm.



Kuva 1. Maaperätiedot ja paalun mitat.

### 3 Paalun kuormat

Tuen 1 sipulipaalun 1 mitoituskuorma lasketaan eri ohjejärjestelmien mukaan. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan paalun mitoitus tehdään tapauksille B ja C, joista toinen antaa määrävän mitoituksen.

Sipulipaalun laskennassa käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusapaukset ovat samat kuin laskentaesimerkissä 3. Kuormat yhdistetään laskentaesimerkin 3 mukaan. Paalun ominaiskuormat ja erilaisten ohjejärjestelmien mukaiset osavarmuusluvut ja mitoituskuormat on esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1.* Yhteenveto sipulipaalun kuormista, eri ohjejärjestelmien mukaiset kuormien osavarmuusluvut ja mitoituskuormat.

Kuormat		Kuormien osavarmuusluvut							
	V (kN)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat									
Kuorma kannelta	1847	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Pilari	53	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Paalu	192	1	1	1,35	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat									
Liikennekuorma	1553	1	1,3	1,35	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Mitoituskuorma (kN)		3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111

### 4 Sipulipaalun geotekninen kantavuus

Sipulipaalun geotekninen kantavuus lasketaan neljän erilaisen menetelmän mukaan. Käytettäviä menetelmiä ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskavoihin ja ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvat menetelmät. Staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvien menetelmien murtokuorma lasketaan julkaisun Suurpaalutusohje mukaan.

Tielaitoksen ohjeisiin perustuva mitoitusapaus TIEL-sall lasketaan sallittujen jännitysten menetelmällä. Geotekninen kantavuus saadaan jakamalla murtokuorma kokonaisvarmuusluvulla. Muut mitoitusapaukset lasketaan rajatilamenetelmällä. Rajatilamitoituksessa kaikkien ohjejärjestelmien mukaan paalun kärki- ja vaippakantavuuden osavarmuusluku on 1,3. Kantavuuden ominaisarvo saadaan jakamalla paalun murtokuorma  $\xi$ -kertoimella. Eri mitoitusapauksille  $\xi$ -kerroin valitaan laskentaesimerkin 3 mukaan.

#### 4.1 Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva mitoitus

Paalun kärki- ja vaippakantavuus lasketaan julkaisun Suurpaalutusohje mukaan. Kärki- ja vaippakantavuuden summa antaa paalun murtokuorman. Kaikille mitoitusapauksille saadaan sama murtokuorma, josta lasketaan geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo jokaisen ohjejärjestelmän mukaan.

Staattinen kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Kärkivastus:

$$q_p = \sigma_{vp} N_q$$

$$10d = 6,1 \text{ m}$$

$$\sigma_{vp} = 6,1 \cdot 11 = 67,1 \text{ kN/m}^2$$

Keskimääräinen kitkakulma paalun kärjessä:

$$5d = 3,05 \text{ m}$$

$$3d = 1,83 \text{ m}$$

$$\phi = \frac{3,05 \cdot 36 + 1,83 \cdot 36}{3,05 + 1,83} = 36^\circ$$

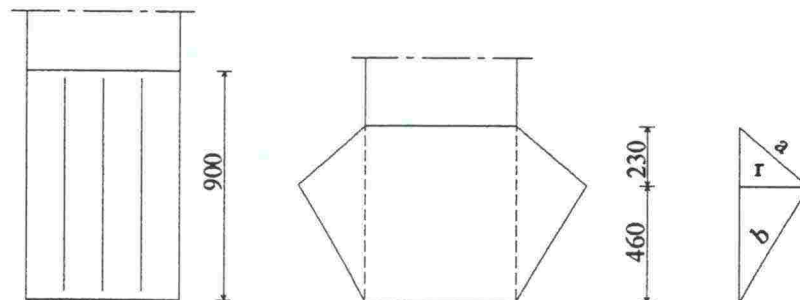
$$\Rightarrow N_q = 85$$

$$q_p = 67,1 \cdot 85 = 5703,5 \text{ kN/m}^2$$

Sipulipaalulla kärkikantavuus lasketaan sipulin suurimman pinta-alan mukaan. Paalun heikennyksen korkeus on 900 mm. Kun sipulilevitystä tehtiin paalu painui 210 mm, joten sipulin korkeudeksi saadaan

$$h_s = h - s = 0,90 - 0,21 = 0,69 \text{ m}$$

Kuvassa 2 on esitetty sipulin suurimman pinta-alan laskennan periaate. Sipulin leveimmän kohdan oletetaan sijaitsevan sipulin kolmannespisteessä.



Kuva 2. Sipulipaalun suurimman pinta-alan laskenta.



Seuraavasta yhtälöryhmästä voidaan laskea kuvan 2 suure  $r$ .

$$\begin{aligned} a + b &= 900 \\ 230^2 + r^2 &= a^2 \\ 460^2 + r^2 &= b^2 \end{aligned} \quad \Rightarrow r = 279 \text{ mm}$$

Paalun suurimmaksi halkaisijaksi sipulin kohdalta saadaan:

$$D_s = D + 2r = 0,61 + 2 \cdot 0,279 = 1,17 \text{ m}$$

Laskennassa paalun kärjen halkaisijan arvona käytetään 1,1 m. Halkaisijan arvo pyöristetään alaspäin, koska todellisuudessa sipulin muoto on kaareva.

Sipulipaalun kärkikantavuus, joka on laskettu sipulin suurimman pinta-alan mukaan:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,1}{2} \right)^2 \cdot 5703,5 = 5420,22 \text{ kN}$$

Paalun vaippavastus:

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \phi_a$$

Taulukossa 2 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen maakerroksittain julkaisun Suurpaalutusohje mukaan. Taulukon 2 kerroin  $K_s \tan \phi_a$  saadaan ohjeen mitoituskäyrästä. Vaippakantavuus lasketaan maakerrokselle, jonka kitkakulma on vakio. Paalun kokonaisvaippakantavuus saadaan laskemalla kerrosten vaippakantavuudet yhteen.

Taulukko 2. Vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan.

Maakerros	$\phi$	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_s \tan \phi_a$	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	43,6	-	-	-
Kerros B	30	51,3	0,19	9,75	93,39
Kerros C	36	60,25	0,44	26,51	334,28

Kerroksen C vaippakantavuuden arvoon ei oteta huomioon sipulin osaa eikä osaa, jonka korkeus on  $2d$  sipulin yläpuolella. Vaippakantavuus laskennassa kerroksen C korkeus on:

$$z = 9,35 - 0,65 - 0,90 - 2 \cdot 0,61 = 6,58 \text{ m}$$

Sipulipaalun kokonaisvaippakantavuus Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 93,39 + 334,28 = 427,67 \text{ kN}$$

Sipulipaalun murtokuorma staattiseen kantavuuskaavaan perustuvan menetelmän mukaan:

$$P_u = 5420,22 + 427,67 = 5848 \text{ kN}$$

## 4.2 Kairausvastukseen perustuva menetelmä

Kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Heijarikairauksia ei ole tehty kärjen tasolle saakka. Arvioidaan keskimääräinen kairausvastus kuvaajan siltä osalta, joka osuu sipulin kärkivyöhykkeen alueelle.

Keskimääräinen arvioitu heijarikairausvastus paalun kärjessä:

$$\frac{0,2 \cdot (30 + 24 + 66 + 38 + 28 + 30 + 56) + 0,6 \cdot 100}{2,0} = 57 \text{ l/0,2 m}$$

$$\Rightarrow q_p = 11000 \text{ kN/m}^2$$

Sipulipaalun kärkikantavuuden määrittämisessä käytettävä pinta-ala on sama kuin staattiseen kantavuuskaavaan perustuvassa mitoitusmenetelmässä.

Sipulipaalun kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,1}{2} \right)^2 \cdot 11000 = 10453,65 \text{ kN}$$

Taulukossa 3 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan.

Taulukko 3. Vaippakantavuuden laskeminen.

Maakerros	Keskimäär. lyöntivastus	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	-	-
Kerros B	7	20	191,64
Kerros C	37	80	1008,78

Kerroksen C vaippakantavuuden arvoon ei oteta huomioon sipulin osaa eikä osaa, jonka korkeus on 2d sipulin yläpuolella. Vaippakantavuuden laskennassa kerroksen C korkeus on 6,58 m

Sipulipaalun kokonaisvaippakantavuus Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 191,64 + 1008,78 = 1200,42 \text{ kN}$$

Sipulipaalun murtokuorma kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan:

$$P_u = 10453,65 + 1200,42 = 11654 \text{ kN}$$

#### 4.3 Dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuva menetelmä

Lasketaan sipulipaalun P1 murtokuorma dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuvilla menetelmillä. Paalun P1 painuman ja jouston summa oli 50,5 mm ja paaluun siirtynyt energia 228 kNm dynaamisten koekuormitusten perusteella. Paalun kyljestä mitattu paalun painuma oli 0,5 mm, joten paalun jousto oli 50 mm. Pudotusjärkeen paino oli 105 kN. Teräksen kimmoerotin on  $2,1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$  ja paalun teräspoikkileikkausala  $0,0235 \text{ m}^2$ . Paalun murtokuorma lasketaan seuraavilla dynaamisilla paalutuskaavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{sAE_p}{L} + \sqrt{\frac{2wHAE_p}{L} + \left(\frac{sAE_p}{L}\right)^2}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{e_f w H}{s + (C_1 + C_2 + C_3) / 2} \cdot \frac{w + n^2 w_p}{w + w_p}$$

Janbu (vanha):

$$P_u = \frac{wH}{k_u s}$$

$$k_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda_e / C_d})$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 w_p / w$$

$$\lambda_e = \frac{wHL}{AE_p s^2}$$

Danish:

$$P_u = \frac{e_f w H}{s + \sqrt{e_f w H L / 2 A E_p}}$$



Gates:

$$P_u = 96 \sqrt{e_f w H} (2,4 - \log s)$$

missä

$s$	on paalun painuma,
$A$	on paalun poikkileikkausala,
$E_p$	on paalun kimmokerroin,
$L$	on paalun pituus,
$C_1$	on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmainen muodonmuutos (0-5 mm),
$C_2$	on paalun kimmainen muodonmuutos,
$C_3$	on maan kimmainen muodonmuutos,
$w_p$	on paalun paino ja
$w$	on järkäleen paino.

Hiley'n, Danish ja Gates'in dynaamisiin paalutuskavoihin sijoitetaan todellinen paaluun siirtynyt energia järkäleen tehokkuuskertoimen  $e_f$ , lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalle. Hiley'n kaavassa myös kaavan jälkimmäinen osa  $((w+n^2 w_p)/(w+w_p))$ , joka kuvaa iskun tehokkuutta, jätetään kaavasta pois, kun käytetään dynaamisella koekuormituksella mitattua todellista paaluun siirtynyttä energiaa. Janbu'n sekä Weisbach'in paalutuskavoiissa käytetään todellista paaluun siirtynyttä energiaa lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalla. Hiley'n kaavassa iskutyynyn ja paalun yläpään kimmoisen muodonmuutoksen arvona käytetään 2 mm sekä paalun ja maan kimmoisen muodonmuutosten summana paalun joustoa, joka oli 50 mm.

Teräsputken pituus oli 30,3 m koekuormitushetkellä. Putken massa on 184 kg/m. Betonitulpan ja sipuliosan betonin paino on 19,7 kN. Paalun aluslevyn paino on 0,5 kN. Sipuli-paalun paino koekuormitushetkellä on (ennen varren betonointia):

$$w_p = 30,3 \cdot 184 \cdot 9,81 + 19700 + 500 = 74900 \text{ N} = 74,9 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma lasketaan edellä mainituilla kaavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{0,0005 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{30,3} + \sqrt{\frac{2 \cdot 228 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{30,3} + \left(\frac{0,0005 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{30,3}\right)^2}$$

$$= 8530 \text{ kN}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{228}{0,0005 + (0,002 + 0,050) / 2} = 8604 \text{ kN}$$

Janbu (vanha):

$$\lambda_e = \frac{228 \cdot 30,3}{0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 0,0005^2} = 5608,16$$
$$C_d = 0,75 + 0,15 \cdot 74,9 / 105 = 0,857$$
$$k_u = 0,857(1 + \sqrt{1 + 5608,16 / 0,857}) = 70,18$$
$$P_u = \frac{228}{70,18 \cdot 0,0005} = 6497 \text{ kN}$$

Danish:

$$P_u = \frac{228}{0,0005 + \sqrt{228 \cdot 30,3 / 2 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}} = 8452 \text{ kN}$$

Gates:

$$P_u = 96\sqrt{288}(2,4 - \log 0,0005) = 8264 \text{ kN}$$

Sipulipaalun murtokuormat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Sipulipaalun murtokuorma dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuen.

	Weisbach	Hiley	Janbu (vanha)	Danish	Gates
Murtokuorma (kN)	8530	8604	6497	8452	8264

4.4 Dynaamisten koekuormitusten tulokset

Mikonkorven risteyssillan paaluista on koekuormitettu kaksi sipulipaalua. Samanlaisten paalujen kokonaismäärä on neljä. Dynaamisten koekuormitusten antamat murtokuormat ovat 7 680 ja 7 600 kN. Koekuormitustulosten keskiarvo on 7 640 kN ja alin arvo 7 600 kN.

5 Laskentaesimerkin tulokset

Seuraavissa taulukoissa on esitetty eri ohjejärjestelmien mukaan lasketut paalun geotekniset kantavuudet, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut eri mitoitusmenetelmillä. Mitoitusvarmuusluku on paalun geoteknisen kantavuuden ja mitoituskuorman suhde.

Taulukossa 5 on esitetty staattiseen kantavuuskaavaan perustuvan menetelmän antamat mitoitusvarmuusluvut eri ohjejärjestelmille. Taulukossa 6 on esitetty kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamat mitoitusvarmuusluvut sipulipaalulle.

**Taulukko 5.** Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staattnen kantavuuskaava								
- murtokuorma	5848	5848	5848	5848	5848	5848	5848	5848
- kantavuuden omin.arvo	-	3655	3899	3899	3899	3899	3655	3655
- geotekninen kantavuus	1949-2339	2812	2999	2999	2999	2999	2812	2812
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	0,53-0,64	0,68	0,61	0,61	0,58	0,73	0,58	0,68

**Taulukko 6.** Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kairausvast. per. men.								
- murtokuorma	11654	11654	11654	11654	11654	11654	11654	11654
- kantavuuden omin.arvo	-	7284	7769	7769	7769	7769	7284	7284
- geotekninen kantavuus	3885-4662	5603	5976	5976	5976	5976	5603	5603
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	1,07-1,28	1,36	1,21	1,21	1,16	1,45	1,16	1,36

Taulukkojen 5 ja 6 mukaan eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoituksista neljän viimeisen tapauksen määräävän mitoituksen antaa tapaus B. Eurocode-ohjejärjestelmän määräävien tapauksien antamat mitoitusvarmuuslukujen arvot ovat todella lähellä toisiaan. Eurocodien mukaiset määräävät mitoitukset antavat mitoitusvarmuusluvulle arvoja, jotka ovat tielaitoksen mitoitusohjeen TIEL-sall antamien mitoitusvarmuuslukujen raja-arvojen keskivaiheilla.

Taulukoissa 7, 8, 9, 10 ja 11 on esitetty dynaamisten paalutuskaavojen perusteella lasketut geoteknisen kantavuuden arvot, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut sipulipaalulle. Laskennassa on käytetty viittä erilaista dynaamista paalutuskaavaa. Paalutuskaavojen antamat murtokuormat vaihtelevat välillä 6 497 - 8 604 kN.



Taulukoissa 7, 8 ja 9 on esitetty sipulipaalun mitoitusvarmuusluvun laskenta Weisbach'in, Hiley'n ja Janbu'n dynaamisten paalutuskäävojen perusteella.

*Taulukko 7.* Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku, kun paalun murtokuorma on laskettu Weisbach'in dynaamisella paalutuskäävalla.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Weisbach								
- murtokuorma	8530	8530	8530	8530	8530	8530	8530	8530
- kantavuuden omin.arvo	-	5331	5687	5687	5687	5687	5331	5331
- geotekninen kantavuus	2843-3412	4101	4374	4374	4374	4374	4101	4101
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	0,78-0,94	1,00	0,89	0,89	0,85	1,06	0,85	1,00

*Taulukko 8.* Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku, kun paalun murtokuorma on laskettu Hiley'n dynaamisella paalutuskäävalla.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Hiley								
- murtokuorma	8604	8604	8604	8604	8604	8604	8604	8604
- kantavuuden omin.arvo	-	5378	5736	5736	5736	5736	5378	5378
- geotekninen kantavuus	2868-3442	4137	4412	4412	4412	4412	4137	4137
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	0,79-0,94	1,01	0,90	0,90	0,86	1,07	0,85	1,01

*Taulukko 9.* Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku, kun paalun murtokuorma on laskettu Janbu'in dynaamisella paalutuskäävalla.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Janbu								
- murtokuorma	6497	6497	6497	6497	6497	6497	6497	6497
- kantavuuden omin.arvo	-	4061	4331	4331	4331	4331	4061	4061
- geotekninen kantavuus	2166-2599	3124	3332	3332	3332	3332	3124	3124
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	0,59-0,71	0,76	0,68	0,68	0,65	0,81	0,65	0,76

Taulukoissa 10 ja 11 on esitetty sipulipaalun mitoitusvarmuusluvun laskenta Danish ja Gates'n dynaamisten paalutuskaavojen perusteella.

*Taulukko 10.* Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku, kun paalun murtokuorma on laskettu Danish'in dynaamisella paalutuskaavalla.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Danish								
- murtokuorma	8452	8452	8452	8452	8452	8452	8452	8452
- kantavuuden omin.arvo	-	5283	5635	5635	5635	5635	5283	5283
- geotekninen kantavuus	2817-3381	4063	4334	4334	4334	4334	4063	4063
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	0,77-0,93	0,99	0,88	0,88	0,84	1,05	0,84	0,99

*Taulukko 11.* Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku, kun paalun murtokuorma on laskettu Gates'in dynaamisella paalutuskaavalla.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Gates								
- murtokuorma	8264	8264	8264	8264	8264	8264	8264	8264
- kantavuuden omin.arvo	-	5165	5509	5509	5509	5509	5165	5165
- geotekninen kantavuus	2755-3306	3973	4238	4238	4238	4238	3973	3973
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	0,76-0,91	0,97	0,86	0,86	0,82	1,03	0,82	0,97

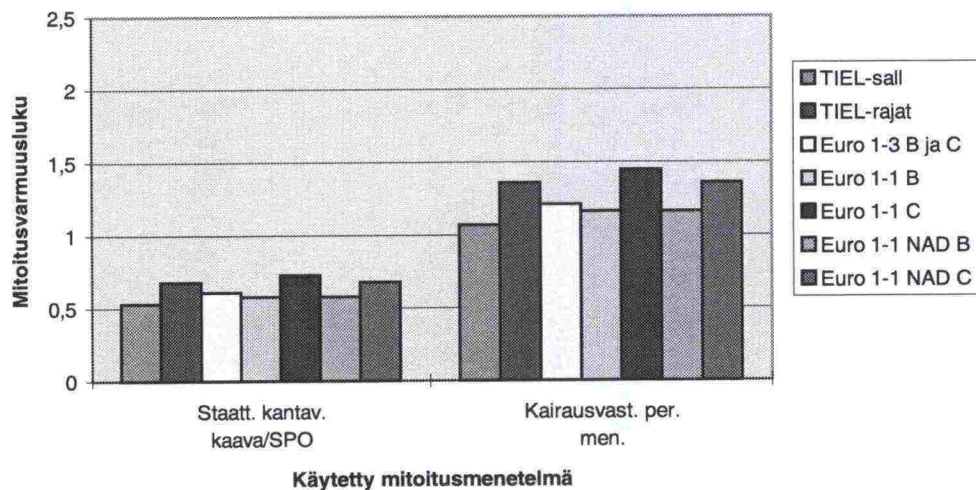
Taulukoiden 7, 8, 9, 10 ja 11 perusteella Janbu'n paalutuskaava antaa mitoitusvarmuusluvulle alhaisimmat arvot. Jokaisella paalutuskaavalla tielaitoksen mitoitusapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuuslukujen antamien raja-arvojen väliin mahtuvat eurocode-ohjejärjestelmän mukaan laskettujen määräävien tapausten antamat mitoitusvarmuusluvut. Mitoitustapausta TIEL-rajat antaa korkeampia arvoja mitoitusvarmuusluvulle kuin muut määräävät tapaukset.

Taulukossa 12 on esitetty dynaamisten koekuormitusten perusteella lasketut geoteknisen kantavuuden arvot sekä mitoitusvarmuusluvut sipulipaalulle eri ohjejärjestelmien mukaan. Rajatilamitoituksessa geoteknisen kantavuuden ominaisarvolle saadaan kaksi arvoa. Toinen lasketaan käyttämällä koekuormitustulosten alinta arvoa, toinen käyttäen tulosten keskiarvoa. Kantavuuden ominaisarvo on näistä arvoista pienempi. Lopullinen geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuuskertoimella.

Taulukko 12. Sipulipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku dynaamisten koekuormitustulosten mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Dynaaminen koekuormitus								
- murtokuorma	7680	7600/7640	7600/7640	7600/7640	7600/7640	7600/7640	7600/7640	7600/7640
- kantavuuden omin.arvo	-	6080/5659	6080/5659	6080/5659	6080/5659	6080/5659	6080/5659	6080/5659
- geotekninen kantavuus	3840	4353	4353	4353	4353	4353	4353	4353
Mitoituskuorma	3645	4111	4921	4921	5154	4111	4840	4111
Mitoitusvarmuusluku	1,05	1,06	0,88	0,88	0,84	1,06	0,90	1,06

Kuvassa 3 on esitetty maan lujuusparametreihin perustuvien menetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut sipulipaalulle.

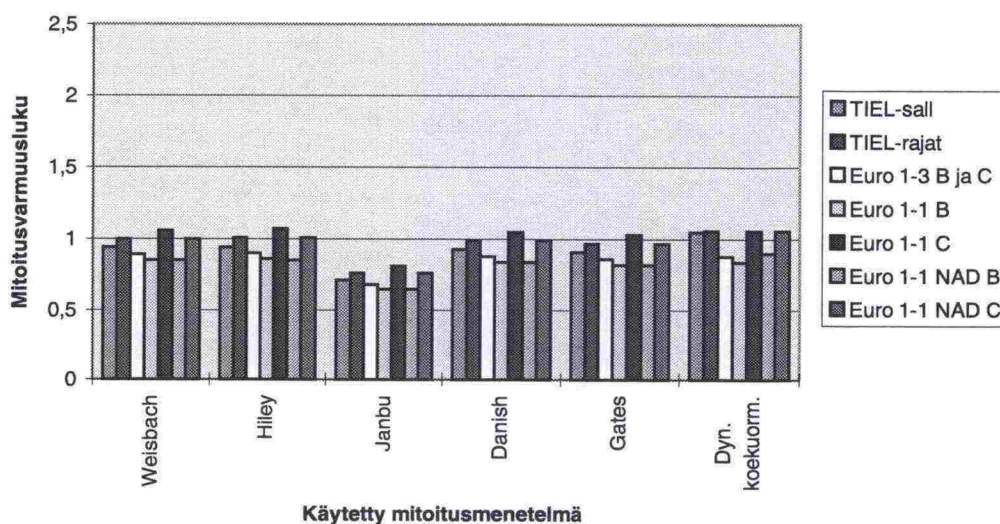


Kuva 3. Eri ohjejärjestelmien antamat mitoitusvarmuusluvut staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä.

Kuvassa 3 tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmän mitoitusvarmuusluvun arvona on käytetty luvun korkeinta arvoa, joka vastaa kokonaisvarmuuslukua 2,5. Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva menetelmä antaa paalulle murto-kuorman, joka on noin puolet kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamasta murto-kuormasta. Paalun kantavuuden alhaiset arvot johtuvat mitoituksessa käytetyistä paalun kärjen kitkakulman alhaisesta arvosta.

Kuvassa 4 on esitetty energiatarkasteluihin perustuvien mitoitusmenetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut sipulipaalulle.





Kuva 4. Eri ohjejärjestelmien antamat mitoitusvarmuusluvut dynaamisiin paalutuskavaoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvilla menetelmillä.

Laskentaesimerkin perusteella voidaan todeta, että paalun mitoituskuorman ja geoteknisen kantavuuden suhde riippuu käytetystä mitoitusmenetelmästä ja ohjejärjestelmästä. Jos sipuli-paalun mitoitus tehdään staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen tai dynaamisiin paalutuskavaoihin perustuvilla mitoitusmenetelmillä ja lasketaan tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmän mukainen mitoitus, antaa mitoitusstapaus TIEL-sall mitoitusvarmuusluvun raja-arvot, joiden sisällä eurocodien mukaiset määräävät mitoitusstapaukset B pysyvät mitoitusmenetelmittään. Tielaitoksen mitoitusstapaus TIEL-rajat antaa aina saman tuloksen kuin eurocodien mukainen mitoitusstapaus Euro 1-1 NAD C mitoitusmenetelmittään.

Dynaamisiin koekuormituksiin perustuvilla mitoituksille tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmä antaa korkeamman arvon kantavuuden ja mitoituskuorman suhteelle kuin eurocodien mukaiset määräävät mitoitukset B.

## LASKENTAESIMERKKI 6. Ounasjoen silta Franki-putkipaaluryhmä, tuki 4

### 1 Käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusmenetelmät

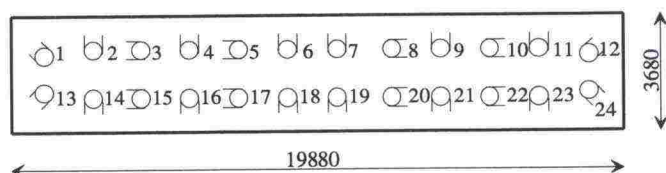
Ounasjoen sillan välituen 4 Franki-putkipaaluryhmän mitoitus tehdään tielaitoksen ohjeiden sekä eurocode-ohjejärjestelmän mukaan. Tielaituksen ohjeiden mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä TIEL-sall ja TIEL-rajat. Tielaituksen mitoitus TIEL-sall perustuu sallittujen jännitysten menetelmään ja mitoitus TIEL-rajat rajatilamenetelmään. Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan paaluryhmän mitoitus tehdään tapauksien B ja C mukaan. Eurocodien mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä Euro 1-3 B ja C, Euro 1-1 B ja C sekä Euro 1-1 NAD B ja C. Mitoitustapauksien Euro 1-3 B ja C kuormitusohjeina käytetään Eurocode 1, Osaa 1: Suunnitteluperusteet ja Osaa 3: Siltojen liikennekuormat. Mitoitustapausten Euro 1-1 B ja C kuormitusohjeina käytetään Eurocode 1, Osaa 1. Edellä mainittujen eurocode-ohjejärjestelmien mukaisten mitoitustapausten geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7. Mitoitustapauksien Euro 1-1 NAD B ja C kuormitusohjeina käytetään Eurocode 1, Osaa 1 ja siihen liittyvää kansallista soveltamisasiakirjaa (NAD) ja tapauksien geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7 sekä sen kansalliseen soveltamisasiakirjaan.

Tuen 4 ominaiskuormat tunnetaan. Ominaiskuormista lasketaan määrävien kuormayhdistelmien mitoituskuormat ohjejärjestelmittäin. Yksinkertaisella käsinlaskentamenetelmällä lasketaan likimääräinen kuormien jakautuminen paaluille ja suurin paalukuorman mitoitusarvo.

Paalujen geotekninen kantavuus lasketaan neljällä menetelmällä. Käytetyt menetelmät ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormituksiin perustuvat menetelmät. Näillä menetelmällä saatuja paalujen geoteknisiä kantavuuksia verrataan paalujen mitoituskuormiin ohjejärjestelmittäin.

### 2 Paaluperustuksen mitat

Kuvassa 1 on esitetty Ounasjoen sillan tuen 4 Franki-putkipaaluryhmän tasokuva ja paalujen numerointi.

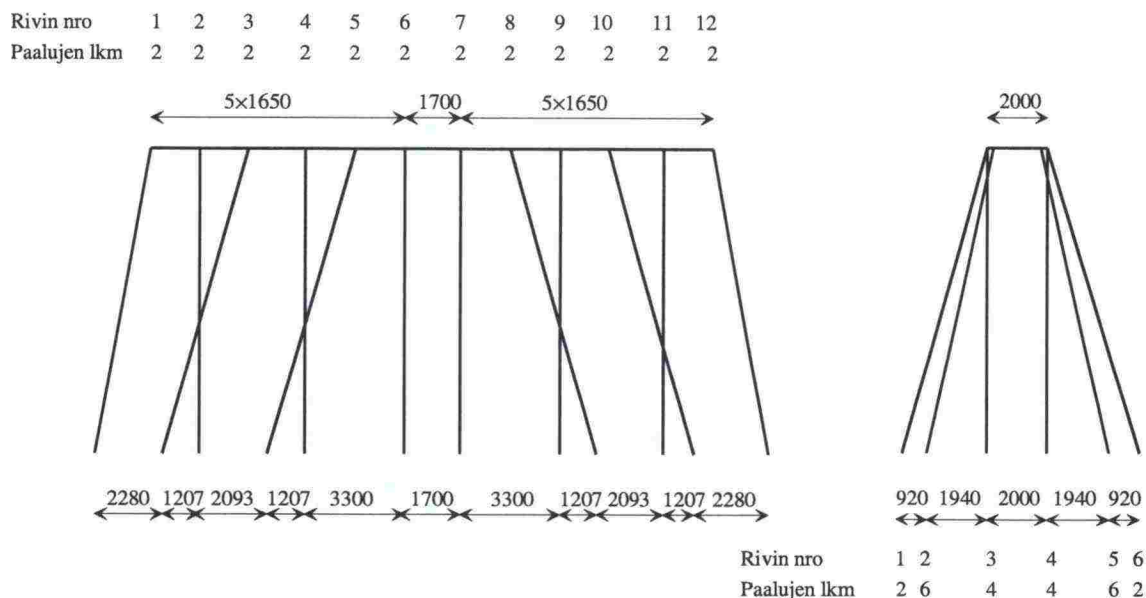


#### PAALUJEN MITAT:

Franki-putkipaalu  
 $D = 610 \text{ mm}$   
 $t = 12,5 \text{ mm}$   
 $L = 17,37 \text{ m}$

Kuva 1. Franki-putkipaaluryhmän tasokuva.

Kuvassa 2 on esitetty paaluryhmän mitat sillan poikki- ja pituussuunnassa. Kuvassa 2 on esitetty myös paalukuormien laskennassa käytettävä paalurivien numerointi.



Kuva 2. Paaluryhmän mitat sillan poikki- ja pituussuunnassa.

### 3 Paaluryhmään kohdistuvat kuormat

Tuen 4 Franki-putkipaaluryhmään kohdistuvat ominaiskuormat ja erilaisten ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville mitoitusapauksille on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Paaluperustukseen kohdistuu useita muuttuvia kuormia, joten määräävä kuormayhdistelmä etsitään kokeilemalla. Paaluryhmä mitoitetaan sillan suunnassa sekä kohtisuorassa sillan suuntaa vastaan. Taulukossa 1 on esitetty ohjejärjestelmien määräävät kuormitusapaukset, kun mitoitetaan paaluryhmää sillan suunnassa.

Taulukko 1. Yhteenvedo kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville kuormitusapauksille, kun mitoitetaan paaluryhmää sillan suunnassa.

Kuormat						Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B ja C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat												
Oma paino	-5849					1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Kuorma kannelta	-23000					1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat												
Liikennekuorma	-4760				10230	1	0,8	0,78	1,05	0,91	1,05	0,91
Laakerikitka		1320	9900			0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Jääkuorma												
- sillan suuntaan 1)		2715	6245			1	1,3	1,5	1,5	1,3	1,5	1,3
- poikkisuuntaan 1)				1800	10260	0	0	0	0	0	0	0
Sivusysäys				125	940	0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Tuulikuorma				300	2250	0,5	0,8	1,5	0,9	0,78	0,75	0,65

1) keskenään vaihtoehtoisia kuormia.



Taulukossa 2 on esitetty ohjejärjestelmien määräävät kuormitustapaukset, kun mitoitetaan paaluryhmää sillan poikkisuunnassa.

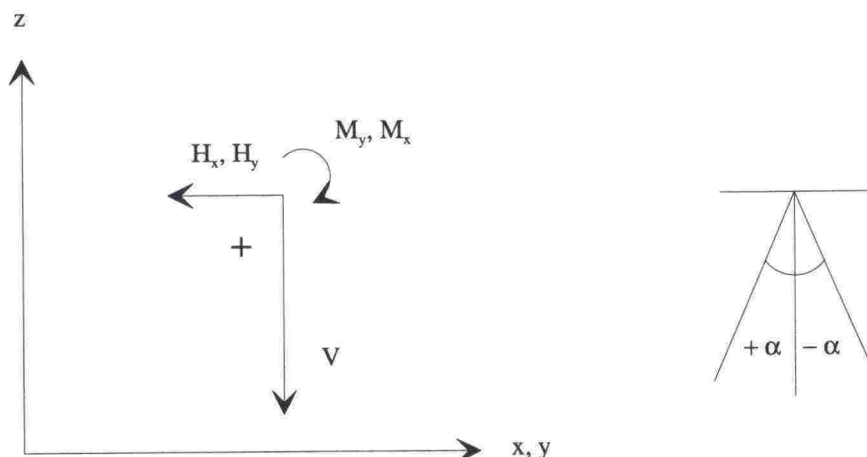
**Taulukko 2.** Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville kuormitustapauksille, kun mitoitetaan paaluryhmää sillan poikkisuunnassa.

Kuormat						Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	H <sub>x</sub> (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	H <sub>y</sub> (kN)	M <sub>x</sub> (kNm)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B ja C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat												
Oma paino	-5849					1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Kuorma kannelta	-23000					1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat												
Liikennekuorma	-4760				10230	1	0,8	0,78	1,05	0,91	1,05	0,91
Laakerikitka		1320	9900			0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Jääkuorma												
- sillan suuntaan 1)		2715	6245			0	0	0	0	0	0	0
- poikkisuuntaan 1)				1800	10260	1	1,3	1,5	1,5	1,3	1,5	1,3
Sivusysäys				125	940	0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Tuulikuorma				300	2250	0,5	0,8	1,5	0,9	0,78	0,75	0,65

1) keskenään vaihtoehtoisia kuormia.

### 3.1 Paalujen mitoituskuormat

Lasketaan paaluryhmään kohdistuvien kuormien jakautuminen paaluille yksinkertaisella käsinlaskentamenetelmällä. Laskentamenetelmä on esitetty julkaisussa Pohjarakennus. Laskennassa noudatetaan kuvan 3 mukaisia merkkisääntöjä ja laskentakoordinaatistoa. Vasemmanpuoleisia suureita käytetään, kun lasketaan kuormien jakautumista sillan suunnassa ja oikeanpuoleisia, kun lasketaan kuormien jakautumista sillan poikkisuunnassa.



**Kuva 3.** Laskentakoordinaatisto ja vinojen paalujen merkkisäännöt.

Julkaisun Pohjarakennus mukaan paaluryhmän paalurivin  $i$  yhden paalun laskentakuormaksi  $P_i$  on johdettu seuraava kaava

$$P_i = VC_V + H_x C_H + M_y C_M$$

missä

- $V$  on kuormitusresultantin pystysuora komponentti,
- $H_x$  on kuormitusresultantin vaakasuora komponentti,
- $M_y$  on kuormitusresultantin momentti pisteen  $(x_0, z_0)$  suhteen,
- $C_V$  on pisteessä  $(x_0, z_0)$  vaikuttavan pystysuoran yksikkövoiman aiheuttama paalukuorma rivin  $i$  yhdessä paalussa,
- $C_H$  on pisteessä  $(x_0, z_0)$  vaikuttavan vaakasuoran yksikkövoiman aiheuttama paalukuorma rivin  $i$  yhdessä paalussa ja
- $C_M$  on yksikön suuruisen momentin aiheuttama paalukuorma rivin  $i$  yhdessä paalussa.

Apusuureet  $C_V$ ,  $C_H$  ja  $C_M$  lasketaan seuraavista kaavoista

$$C_V = \frac{1}{\cos \alpha_i} \cdot \frac{v_i}{\sum av} \cdot \frac{\tan \alpha'' - \tan \alpha}{\tan \alpha'' - \tan \alpha'},$$

$$C_H = \frac{1}{\cos \alpha_i} \cdot \frac{v_i}{\sum av \tan \alpha} \cdot \frac{\tan \alpha - \tan \alpha'}{\tan \alpha'' - \tan \alpha'} \text{ ja}$$

$$C_M = \frac{1}{\cos \alpha_i} \cdot \frac{v_i \eta_i}{I}.$$

Edellisten kaavojen apusuureet saadaan seuraavista kaavoista

$$v = \frac{AE}{L} \cos^2 \alpha,$$

$$\tan \alpha' = \frac{\sum av \tan \alpha}{\sum av},$$

$$\tan \alpha'' = \frac{\sum av \tan^2 \alpha}{\sum av \tan \alpha},$$

$$x_0' = \frac{\sum avx}{\sum av},$$

$$x_0'' = \frac{\sum av \tan \alpha \cdot x}{\sum av \tan \alpha},$$

$$z_0 = \frac{x_0' - x_0''}{\tan \alpha' - \tan \alpha},$$

$$x_0 = x_0' + z_0 \tan \alpha',$$

$$\eta = x - x_0 + z_0 \tan \alpha \text{ ja}$$

$$I = \sum a v \eta^2$$

missä

$a$  on paalurivin paalujen lukumäärä.

Kun lasketaan paalujen mitoituskuormia sillan suunnassa, voimat kootaan pisteeseen  $(x_0, z_0)$ . Paaluryhmän vaaka- ja pystykuormat saadaan taulukosta 1. Laskentamomentti saadaan seuraavasta kaavasta

$$M_y = \sum V_i (x_i - x_0) + \sum H_{xi} (z_0 - z_i).$$

Edellä annettuja kaavoja käytetään, kun lasketaan paaluryhmän kuormien jakautumisista sillan suunnassa. Jos laskenta tehdään sillan poikkisuunnassa kaavoihin muutetaan kuvan 3 mukaan vaakakuorman  $H_x$  tilalle  $H_y$ , momentin  $M_y$  tilalle  $M_x$  ja laskentakoordinaatistiksi yz-koordinaatisto.

Ounasjoen sillan tuen 4 Franki-putkipaaluryhmän paalukuormien laskenta tehdään edellä mainittujen kaavojen mukaan. Laskenta tehdään sillan pituus- ja poikkisuunnassa. Määräävä kuormitus suunta on se, joka antaa suurimman paalukuorman yksittäiselle paalulle.

Paalukuormien laskennan havainnollistamiseksi esitetään taulukon 1 mukaisten mitoituspausten TIEL-sall sekä Euro 1-3 B ja C laskenta vierekkäin. Eurocodien siltoja koskevien ohjeiden mukaan mitoituspaaukset Euro 1-3 B ja C on yhdistetty kuormapuolella samaksi mitoituspaaukseksi.

TIEL-sall

Euro 1-3 B ja C

Kuormat

$V_1$	= 5849 kN	$x_1$	= 0
$V_2$	= 23000 kN	$x_2$	= 0
$V_3$	= 4760 kN	$x_3$	= 0
$H_{x1}$	= -660 kN	$z_1$	= 7,5 m
$H_{x2}$	= -2715 kN	$z_2$	= 2,3 m

$V_1$	= 7896,2 kN	$x_1$	= 0
$V_2$	= 31050 kN	$x_2$	= 0
$V_3$	= 3693,8 kN	$x_3$	= 0
$H_{x1}$	= 0 kN	$z_1$	= 7,5 m
$H_{x2}$	= -4072,5 kN	$z_2$	= 2,3 m

Taulukossa 3 on esitetty paalukuormien jakautumisen laskennassa käytettävät apusuureet sillan pituussuunnassa. Kolmannen sarakkeen lausekkeen  $AE/L$  laskennassa on käytetty pysyvuoran paalun pituutena 10 metriä. Laskennassa on huomioitu vain paalun pituus  $L$ , koska



paalujen alat ja kimmokertoimet ovat yhtä suuria kaikille paaluille. Taulukon 3 mukaiset apusuureet ovat kaikille ohjejärjestelmille samat sillan pituussuunnassa.

Taulukko 3. Apusuureiden laskenta, kun mitoitus tehdään sillan pituussuunnassa.

Rivi i	a	AE/L	x (m)	$\alpha$	$\tan\alpha$	$\cos\alpha$	v	av	avtan $\alpha$	av(tan $\alpha$ ) <sup>2</sup>	avx	avxtan $\alpha$
1	2	0,096	-1	15,96	0,286	0,961	0,089	0,18	0,051	0,015	-0,177	-0,051
2	6	0,098	-0,85	12,35	0,219	0,977	0,094	0,56	0,123	0,027	-0,477	-0,104
3	4	0,100	-1	0	0	1,000	0,100	0,40	0	0	-0,4	0
4	4	0,100	1	0	0	1,000	0,100	0,40	0	0	0,4	0
5	6	0,098	0,85	-12,35	-0,219	0,977	0,094	0,56	-0,123	0,027	0,477	-0,104
6	2	0,096	1	-15,96	-0,286	0,961	0,089	0,18	-0,051	0,015	0,177	-0,051
Summa								2,28	0	0,083	0	-0,310

Kyseessä on symmetrinen paaluryhmä, joten osa apusuureiden laskennassa käytettävistä summalausekkeista antaa tuloksen 0 ja apusuureiden  $C_V$ ,  $C_H$  ja  $C_M$  laskenta on mahdotonta. Jos paalujen sijoittelussa käytetään pieniä epäkeskeisyyksiä, paalujen pituuksia muutetaan hieman tai paalukulmat poikkeavat toisistaan, antavat summalausekkeet nolasta eroavia arvoja. Pieniä epäkeskeisyyksiä käyttäen saadaan pisteelle  $(x_0, z_0)$  seuraava arvo

$$z_0 = \frac{x_0' - x_0''}{\tan \alpha'' - \tan \alpha'} = 3,74 \text{ m}$$

$$x_0 = x_0' + z_0 \tan \alpha' = 0.$$

Pisteen  $(x_0, z_0)$  koordinaatit riippuvat vain paaluryhmän geometriasta, joten sillan suunnassa piste  $(x_0, z_0)$  on sama kaikille eri ohjejärjestelmien mukaisille mitoitusapuauksille. Pisteen avulla voidaan laskea mitoitusmomentit ohjejärjestelmittäin. Mitoitustapausten TIEL-sall ja Euro 1-3 B ja C mitoitusmomenteiksi saadaan

TIEL-sall

Euro 1-3 B ja C

$$M_y = 5849 \cdot 0 + 23000 \cdot 0 - 660 \cdot (3,74 - 7,5) - 2715 \cdot (3,74 - 2,3) = -1443,5 \text{ kNm}$$

$$M_y = 7896,2 \cdot 0 + 31050 \cdot 0 - 4073 \cdot (3,74 - 2,3) = -5883,1 \text{ kNm}$$

Pieniä epäkeskeisyyksiä käyttäen saadaan myös apusuureille  $C_V$ ,  $C_H$  ja  $C_M$  arvot. Apusuureiden arvot on esitetty taulukossa 4. Apusuureiden arvot riippuvat vain paaluryhmän geometriasta, joten ne ovat jokaiseen paaluriviin  $i$  liittyviä vakioita.

Taulukko 4. Apusuureet ja mitoitusapuauksien TIEL-sall ja Euro 1-3 B ja C paalukuormat, kun mitoitus tehdään sillan pituussuunnassa.

Rivi i	Apusuureet			Paalukuormat (kN)	
	$C_V$	$C_H$	$C_M$	TIEL-sall	Euro 1-3 B ja C
1	0,0415	0,3229	0,0085	294	406
2	0,0422	0,2512	-0,004	576	798
3	0,0432	0	-0,125	1632	2575
4	0,0432	0	0,125	1272	1109
5	0,0422	-0,251	0,0036	2261	2801
6	0,0415	-0,323	-0,008	2498	3136

Taulukossa 4 on myös esitetty mitoitus tapauksien TIEL-sall sekä Euro 1-3 B ja C paalukuormat. Suurin paalukuorma on kuvan 1 paaluilla 12 ja 24. Tielaitoksen tapauksen suurin paalukuorma on 2498 kN ja mitoitus tapauksen Euro 1-3 B ja C 3136 kN.

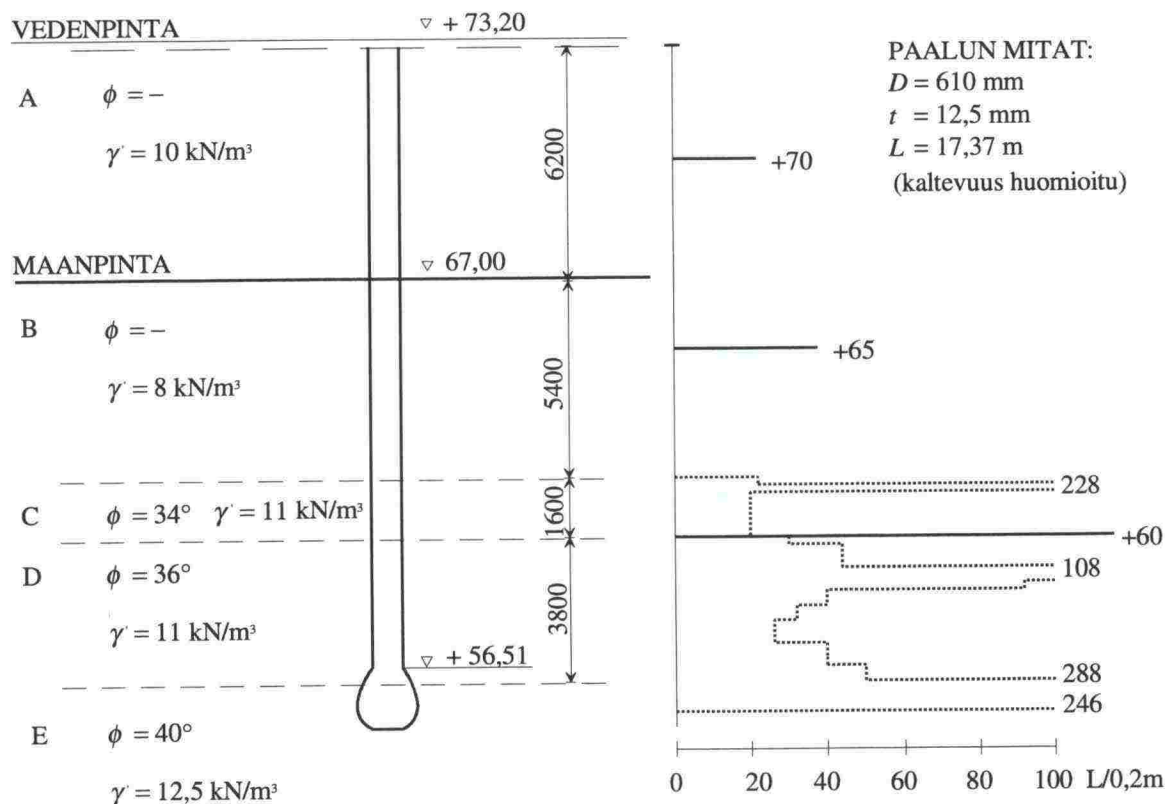
Samalla tavalla lasketaan muiden mitoitus tapauksien mukaiset paalukuormat sillan suunnassa. Sillan poikkisuunnassa lasketaan ensin apusuureet ja sen jälkeen paalukuormat. Taulukossa 5 on esitetty suurimmat paalukuormat ohjejärjestelmittäin sillan pituus- ja poikkisuunnassa. Sillan poikkisuunnassa suurin paalukuorma on kuvan 1 paaluilla 5 ja 17.

Taulukko 5. Suurimmat paalukuormat, kun tehdään mitoitus sillan pituus- ja poikkisuunnassa.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B ja C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Suurin paalukuorma (kN)							
- sillan pituussuunnassa	2498	2847	3136	3593	2911	3414	2911
- sillan poikkisuunnassa	2288	2586	3228	3238	2603	3038	2585

#### 4 Maaperätiedot ja paalujen mitat

Kuvassa 4 on esitetty maaperätiedot ja heijarikairausdiagrammi. Franki-putkipaalut on lyöty Franki-menetelmällä.



Kuva 4. Maaperätiedot ja heijarikairausdiagrammi.

## 5 Paalun kantavuus

Yksittäisen Franki-putkipaalun kantavuus lasketaan neljään erilaiseen menetelmään perustuen. Käytettävät menetelmät ovat staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen, dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormitustuloksiin perustuvat menetelmät.

### 5.1 Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva menetelmä

Paalun kärki- ja vaippakantavuus lasketaan julkaisun Suurpaalutusohje mukaan. Kärki- ja vaippakantavuuden summa antaa paalun murtokuorman. Kaikille mitoitusapauksille saadaan sama murtokuorma, josta lasketaan geoteknisen kantavuuden mitoitusarvo jokaisen ohjejärjestelmän mukaan.

Staattinen kantavuuskaava Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Paalun kärkekantavuuden laskennassa tarvitaan Franki-anturan läpimittaa. Franki-anturan tekemiseen on käytetty betonia  $1,2 \text{ m}^3$ . Keskimääräinen betonointiannos on  $0,070 \text{ m}^3$ . Betonointityön aikana työputki on noussut  $1,15 \text{ m}$ . Yhden betonointiannoksen jälkeen työputki on noussut n.  $0,0676 \text{ m}$ . Anturan läpimitta voidaan laskea Suurpaalutusohjeen mukaan seuraavasta kaavasta:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,070}{\pi \cdot 0,0676}} = 1,1 \text{ m}$$

Kärkivastus:

$$q_p = \sigma_{vp} \cdot N_q$$

$$10d = 6,1 \text{ m}$$

$$\sigma_{vp} = 0,9 \cdot 12,5 + 3,8 \cdot 11 + 1,4 \cdot 11 = 68,45 \text{ kN/m}^2$$

Keskimääräinen kitkakulma paalun kärjessä:

$$5d = 3,05 \text{ m}$$

$$3d = 1,83 \text{ m}$$

$$\phi = \frac{(0,9 + 1,83) \cdot 40 + 2,15 \cdot 36}{3,05 + 1,83} = 38^\circ$$

$$\Rightarrow N_q = 130$$



$$q_p = 68,45 \cdot 130 = 8898,5 \text{ kN/m}^2$$

Franki-putkipaalulla kärkikantavuus lasketaan anturan suurimman pinta-alan mukaan.

Franki-putkipaalun kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,1}{2} \right)^2 \cdot 8898,5 = 8456,53 \text{ kN}$$

Vaippavastus:

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \phi_a$$

Taulukossa 6 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen maakerroksittain julkaisun Suurpaalutusohje mukaan. Taulukon 6 kerroin  $K_s \tan \phi_a$  saadaan ohjeen mitoituskäyrästä. Vaippakantavuus lasketaan maakerrokselle, jonka kitkakulma on vakio. Paalun kokonaisvaippakantavuus saadaan laskemalla kerrosten vaippakantavuudet yhteen.

Taulukko 6. Vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan.

Maakerros	$\phi$	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_s \tan \phi_a$	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	31	-	-	-
Kerros B	-	55,6	-	-	-
Kerros C	34	51,2	0,33	16,896	51,81
Kerros D	36	58,85	0,44	25,894	173,68

Paalun vaippakantavuuden arvoon ei oteta huomioon anturalevitystä, jolloin kerroksen D korkeus on 3,5 m.

Franki-putkipaalun kokonaisvaippakantavuus Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 51,81 + 173,68 = 225,49 \text{ kN}$$

Franki-putkipaalun murtokuorma staattiseen kantavuuskaavaan perustuvan menetelmän mukaan on

$$P_u = 8456,53 + 225,49 = 8682 \text{ kN}$$

## 5.2 Kairausvastukseen perustuva menetelmä

Kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Keskimääräinen heijarikairausvastus paalun kärjessä:

$$5d = 3,05 \text{ m}$$

$$3d = 1,83 \text{ m}$$

$$\frac{(1,83 + 0,1) \cdot 246 + 0,8 \cdot 267 + 0,4 \cdot 50 + 0,6 \cdot (40 + 26) + 0,4 \cdot 32 + 0,15 \cdot 40}{3,05 + 1,83}$$

$$= 157 \text{ l/0,2 m}$$

Kärkivastus:

$$\Rightarrow q_p = 20 \text{ MPa} = 20000 \text{ kN/m}^2$$

Franki-putkipaalun kärkikantavuuden määrittämisessä käytettävä pinta-ala on sama kuin staattiseen kantavuuskaavaan perustuvassa mitoitusmenetelmässä.

Franki-putkipaalun kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = \pi \left( \frac{1,1}{2} \right)^2 \cdot 20000 = 19006,64 \text{ kN}$$

Taulukossa 7 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan.

Taulukko 7. Vaippakantavuuden laskeminen.

Maakerros	Keskimäär. lyöntivastus	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	-	-
Kerros B	-	-	-
Kerros C	74	90	275,96
Kerros D	48	90	603,66

Paalun vaippakantavuuden arvoon ei oteta huomioon anturaa, jolloin kerroksen D korkeus on 3,5 m.

Franki-putkipaalun kokonaisvaippakantavuus Suurpaalutusohjeen mukaan:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 275,96 + 603,66 = 879,62 \text{ kN}$$

Franki-putkipaalun murtokuorma kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan on:

$$P_u = 19006,64 + 879,62 = 19886 \text{ kN}$$

### 5.3 Dynaamisiin paalutuskavoihin perustuva menetelmä

Tuella 4 on koekuormitettu paalut 13, 16 ja 24. Lasketaan Franki-putkipaalun 16 murtokuorma dynaamisiin paalutuskavoihin perustuvilla menetelmillä. Dynaamisten koekuormitusten perusteella paalun pysyvän painuman ja jouston summa oli 39 mm. Paalun kyljestä mitattu pysyvä painuma oli 2 mm, jolloin paalun jousto oli 37 mm. Paaluun siirtynyt energia oli 197 kNm. Pudotusjätkälleen paino oli 115 kN. Teräksen kimmokerroin on  $2,1 \cdot 10^8$  kN/m<sup>2</sup> ja paalun teräspoikkileikkausala 0,0235 m<sup>2</sup>. Paalun murtokuorma lasketaan seuraavilla dynaamisilla paalutuskavoilla.

Weisbach:

$$P_u = -\frac{sAE_p}{L} + \sqrt{\frac{2wHAE_p}{L} + \left(\frac{sAE_p}{L}\right)^2}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + (C_1 + C_2 + C_3) / 2} \cdot \frac{w + n^2 w_p}{w + w_p}$$

Janbu (vanha):

$$P_u = \frac{wH}{k_u s}$$

$$k_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda_e / C_d})$$

$$C_d = 0,75 + 0,15w_p / w$$

$$\lambda_e = \frac{wHL}{AE_p s^2}$$

Danish:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + \sqrt{e_f wHL / 2AE_p}}$$

Gates:

$$P_u = 96\sqrt{e_f wH} (2,4 - \log s)$$

missä

- $s$  on paalun painuma,
- $A$  on paalun poikkileikkausala,
- $E_p$  on paalun kimmokerroin,
- $L$  on paalun pituus,
- $C_1$  on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmainen muodonmuutos (0-5 mm),



- $C_2$  on paalun kimmainen muodonmuutos,  
 $C_3$  on maan kimmainen muodonmuutos,  
 $w_p$  on paalun paino ja  
 $w$  on järkäleen paino.

Hiley'n, Danish ja Gates'in dynaamisiin paalutuskavaoihin sijoitetaan todellinen paaluun siirtynyt energia järkäleen tehokkuuskertoimen  $e_f$ , lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalle. Hiley'n kaavassa myös kaavan jälkimmäinen osa  $((w+n^2w_p)/(w+w_p))$ , joka kuvaa iskun tehokkuutta, jätetään kaavasta pois, kun käytetään dynaamisella koekuormituksella mitattua todellista paaluun siirtynyttä energiaa. Janbu'n sekä Weisbach'in paalutuskavaoissa käytetään todellista paaluun siirtynyttä energiaa lyöntikorkeuden  $H$  ja järkäleen painon  $w$  tulon tilalla. Hiley'n kaavassa iskutyynyn ja paalun yläpään kimmoisen muodonmuutoksen arvona käytetään 2 mm sekä paalun ja maan kimmoisen muodonmuutosten summana paalun joustoa.

Koekuormitushetkellä teräsputken pituus on 20,03 m. Putken massa on 184 kg/m. Betonitulpan ja -anturan paino on yhteensä 36,2 kN. Franki-putkipaalun paino koekuormitushetkellä on (ennen varren betonointia):

$$w_p = 20,03 \cdot 184 \cdot 9,81 + 36200 = 72400 \text{ N} = 72,4 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma lasketaan edellä mainituilla kaavoilla:

Weisbach:

$$P_u = -\frac{0,002 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{20,03} + \sqrt{\frac{2 \cdot 197 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{20,03} + \left(\frac{0,002 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}{20,03}\right)^2}$$

$$= 9365 \text{ kN}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{197}{0,002 + (0,002 + 0,037) / 2} = 9163 \text{ kN}$$

Janbu (vanha):

$$\lambda_e = \frac{197 \cdot 20,03}{0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 0,002^2} = 200,20$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \cdot 72,4 / 115 = 0,844$$

$$k_u = 0,844(1 + \sqrt{1 + 200,20 / 0,844}) = 13,87$$

$$P_u = \frac{197}{13,87 \cdot 0,002} = 7100 \text{ kN}$$

Danish:

$$P_u = \frac{197}{0,002 + \sqrt{197 \cdot 20,03 / 2 \cdot 0,0235 \cdot 2,1 \cdot 10^8}} = 8950 \text{ kN}$$

Gates:

$$P_u = 96\sqrt{197}(2,4 - \log 0,002) = 6870 \text{ kN}$$

Franki-putkipaalun murtokuormat, jotka on laskettu erilaisilla dynaamisilla paalutuskaavoilla on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Franki-putkipaalun murtokuormat dynaamisten paalutuskaavojen perusteella.

	Weisbach	Hiley	Janbu (vanha)	Danish	Gates
Murtokuorma (kN)	9365	9163	7100	8950	6870

5.4 Dynaamisten koekuormitusten tulokset

Sillasta on koekuormitettu kolme paalua. Samanlaisten Franki-putkipaalujen kokonaismäärä on 24. Koekuormitusten tulokset ovat 7 940, 7 021 ja 7 736 kN. Koekuormitustulosten keskiarvo on 7 566 kN ja alin arvo 7 021 kN. Alin arvo oli paalulla 16.

6 Laskentaesimerkin tulokset

Seuraavissa taulukoissa on esitetty eri ohjejärjestelmien mukaan lasketut paalun geotekniset kantavuudet, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut eri laskentamenetelmillä. Mitoitusvarmuusluku on paalun geoteknisen kantavuuden ja mitoituskuorman suhde. Mitoituskuormina käytetään taulukon 5 antamia suurimpia paalukuormia ohjejärjestelmittäin.

Taulukossa 9 on esitetty staattisen kantavuuskaavan antamat tulokset eri ohjejärjestelmille.

Taulukko 9. Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-raijat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staattinen kantavuuskaava								
- murtokuorma	8682	8682	8682	8682	8682	8682	8682	8682
- kantavuuden omin.arvo	-	5426	5788	5788	5788	5788	5426	5426
- geotekninen kantavuus	2894-3473	4174	4452	4452	4452	4452	4174	4174
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	1,16-1,39	1,47	1,38	1,38	1,24	1,53	1,22	1,43

Taulukon 9 mukaan eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoituksista neljän viimeisen mitoitustapauksen mitoittaa tapaus B. Eurocodien määrittämien tapauksien mitoitusvarmuusluvut mahtuvat tielaitoksen mitoitustapauksen TIEL-sall antamien mitoitusvarmuusluvun raja-arvojen väliin. Tielaitoksen tapaus TIEL-rajat antaa hieman korkeampia arvoja mitoitusvarmuusluvulle.

Taulukossa 10 on esitetty kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamat laskentatulokset Franki-putkipaalulle.

*Taulukko 10.* Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuuslukukairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kairausvast. per. men.								
- murtokuorma	19886	19886	19886	19886	19886	19886	19886	19886
- kantavuuden omin.arvo	-	12429	13257	13257	13257	13257	12429	12429
- geotekninen kantavuus	6629-7954	9561	10198	10198	10198	10198	9561	9561
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	2,65-3,18	3,36	3,16	3,16	2,84	3,50	2,80	3,28

Taulukoissa 11, 12, 13, 14 ja 15 on esitetty dynaamisten paalutuskaavojen antamat mitoitusvarmuusluvut paalulle 16 ohjejärjestelmittäin.

Taulukossa 11 on esitetty Franki-putkipaalun mitoitusvarmuusluvun laskenta, kun paalun murtokuorma on laskettu Weisbach'in dynaamisella paalutuskaavalla.

*Taulukko 11.* Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Weisbach'in dynaamisen paalutuskaavan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Weisbach								
- murtokuorma	9365	9365	9365	9365	9365	9365	9365	9365
- kantavuuden omin.arvo	-	5853	6243	6243	6243	6243	5853	5853
- geotekninen kantavuus	3122-3746	4502	4803	4803	4803	4803	4502	4502
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	1,25-1,50	1,58	1,49	1,49	1,34	1,65	1,32	1,55



Taulukoissa 12, 13 ja 14 on esitetty mitoitusvarmuuslukujen laskenta Franki-putkipaalulle, kun paalun murtokuorma on laskettu Hiley'n, Janbu'n ja Danish dynaamisilla paalutuskäyriä.

**Taulukko 12.** Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Hiley'n dynaamisen paalutuskäyriä perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Hiley								
- murtokuorma	9163	9163	9163	9163	9163	9163	9163	9163
- kantavuuden omin.arvo	-	5727	6109	6109	6109	6109	5727	5727
- geotekninen kantavuus	3054-3665	4405	4699	4699	4699	4699	4405	4405
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	1,22-1,47	1,55	1,46	1,46	1,31	1,61	1,29	1,51

**Taulukko 13.** Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Janbu'n dynaamisen paalutuskäyriä perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Janbu (vanha)								
- murtokuorma	7100	7100	7100	7100	7100	7100	7100	7100
- kantavuuden omin.arvo	-	4438	4733	4733	4733	4733	4438	4438
- geotekninen kantavuus	2367-2840	3413	3641	3641	3641	3641	3413	3413
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	0,95-1,14	1,20	1,13	1,13	1,01	1,20	1,00	1,17

**Taulukko 14.** Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Danish dynaamisen paalutuskäyriä perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Danish								
- murtokuorma	8950	8950	8950	8950	8950	8950	8950	8950
- kantavuuden omin.arvo	-	5594	5967	5967	5967	5967	5594	5594
- geotekninen kantavuus	2983-3580	4303	4590	4590	4590	4590	4303	4303
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	1,19-1,43	1,51	1,42	1,42	1,28	1,58	1,26	1,48

Taulukossa 15 on esitetty mitoitusvarmuuslukujen laskenta Franki-putkipaalulle, kun paalun murtokuorma on laskettu Gates'in dynaamisella paalutuskaavalla.

*Taulukko 15.* Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Gates'in dynaamiseen paalutuskaavan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Gates								
- murtokuorma	6870	6870	6870	6870	6870	6870	6870	6870
- kantavuuden omin.arvo	-	4294	4580	4580	4580	4580	4294	4294
- geotekninen kantavuus	2290-2748	3303	3523	3523	3523	3523	3303	3303
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	0,92-1,10	1,16	1,09	1,09	0,98	1,21	0,97	1,13

Taulukoiden 11, 12, 13, 14 ja 15 mukaan dynaamisten paalutuskaavojen perusteella lasketut mitoitusvarmuuslukujen arvot riippuvat paalutuskaavasta. Gates'n kaava antaa suhteelle alhaisimmat arvot. Jokaisella paalutuskaavalla tielaitoksen mitoitusapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluvun antamien raja-arvojen väliin mahtuvat eurocode-ohjejärjestelmän määräävien mitoitusapausten antamat mitoitusvarmuusluvut. Mitoitusapaus TIEL-rajat antaa korkeampia arvoja kantavuuden ja mitoituskuorman suhteelle kuin tielaitoksen sallitujen jännitysten menetelmä ja eurocodien mukaiset määräävät mitoitusapaukset.

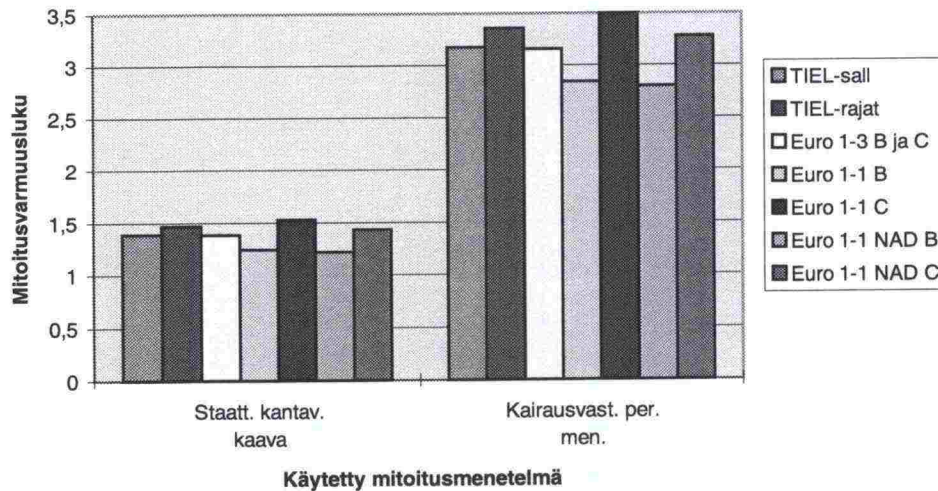
Taulukossa 16 on esitetty Franki-putkipaalun mitoitusvarmuusluvut, jotka on saatu, kun paalun murtokuorma on arvioitu dynaamisilla koekuormituksilla. Rajatilamitoituksessa geoteknisen kantavuuden ominaisarvolle saadaan kaksi arvoa. Toinen lasketaan käyttämällä koekuormitustulosten alinta arvoa, toinen käyttäen tulosten keskiarvoa. Kantavuuden ominaisarvo on näistä arvoista pienempi. Lopullinen geotekninen kantavuus saadaan jakamalla kantavuuden ominaisarvo osavarmuusluvulla, joka on 1,3 lyöntipaaluille kaikkien ohjejärjestelmien mukaisissa rajatilamitoituksissa.

*Taulukko 16.* Franki-putkipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku dynaamisten koekuormitustulosten mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Dynaaminen koekuormitus								
- murtokuorma	7021	7021/7566	7021/7566	7021/7566	7021/7566	7021/7566	7021/7566	7021/7566
- kantavuuden omin.arvo	-	5201/5218	6383/5820	6383/5820	6383/5820	6383/5820	5201/5218	5201/5218
- geotekninen kantavuus	3511	4001	4477	4477	4477	4477	4001	4001
Mitoituskuorma	2498	2847	3228	3228	3593	2911	3414	2911
Mitoitusvarmuusluku	1,41	1,41	1,39	1,39	1,25	1,54	1,17	1,37

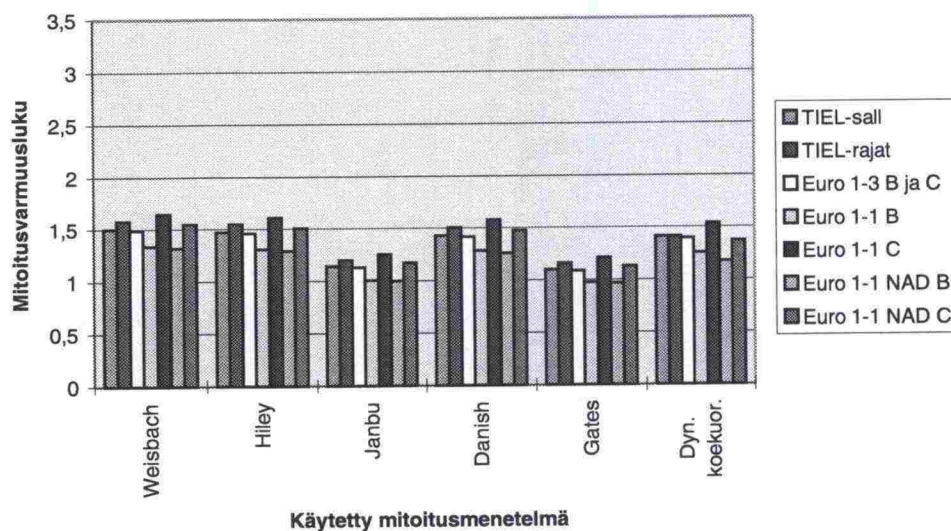


Kuvassa 5 on esitetty maan lujuusparametreihin perustuvien mitoitusmenetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut ohjejärjestelmittain. Kuvassa tielaitoksen tapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluku vastaa kokonaisvarmuuslukua 2,5. Kuvasta huomataan, että eurocode-mitoituksista tapaus B antaa pienemmän mitoitusvarmuusluvun kuin tapaus C, kun kuormien yhdistely on tehty Eurocode 1, Osan 1 mukaan.



Kuva 5. Laskentaesimerkin tulokset staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä.

Kuvassa 6 on esitetty dynaamisten paalutuskaavojen ja dynaamisten koekuormitusten perusteella lasketut mitoitusvarmuusluvut ohjejärjestelmittain.



Kuva 6. Laskentaesimerkin tulokset dynaamisiin paalutuskaavoihin ja dynaamisiin koekuormitukseen perustuvilla menetelmillä.



## LASKENTAESIMERKKI 7. Aurajokilaakson silta Teräsbetonipaaluryhmä, tuki 1

### 1 Käytettävät ohjejärjestelmät ja mitoitusmenetelmät

Aurajokilaakson sillan tuen 1 teräsbetonipaaluryhmän mitoitus tehdään tielaitoksen ohjeiden sekä eurocode-ohjejärjestelmän mukaan. Tuen 1 perustukseen kohdistuu kaksi vaihtoehtoista liikennekuormaa. Vaihtoehtoiset liikennekuormat ovat kuormakaavion 1 mukainen liikennekuorma sekä raskas erikoiskuorma. Molempien kuormayhdistelmien mukaiset mitoitukset lasketaan tielaitoksen ohjeiden sekä eurocode-ohjejärjestelmän mukaan.

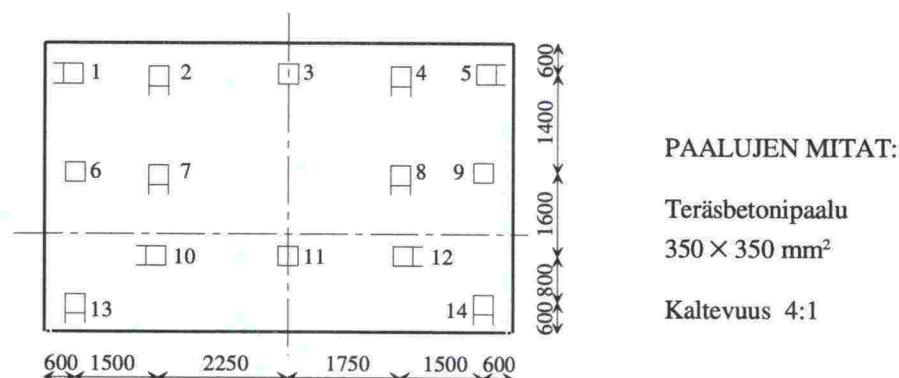
Tielaitoksen ohjeiden mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä TIEL-sall Lk ja Ek sekä TIEL-rajat Lk ja Ek. Tielaitoksen mitoitukset TIEL-sall Lk ja Ek perustuvat sallittujen jännitysten menetelmään ja mitoitukset TIEL-rajat Lk ja Ek rajatilamenetelmään.

Eurocode-ohjejärjestelmän mukaan paaluryhmän mitoitus tehdään tapauksien B ja C mukaan. Eurocodien mukaisista mitoituksista käytetään lyhenteitä Euro 1-3 Lk B ja C, Euro 1-3 Ek B ja C, Euro 1-1 Lk B ja C, Euro 1-1 Ek B ja C, Euro 1-1 NAD Lk B ja C sekä Euro 1-1 NAD Ek B ja C. Mitoitustapauksien Euro 1-3 Lk B ja C sekä Euro 1-3 Ek B ja C kuormitusohjeina käytetään Eurocode 1, Osaa 1: Suunnitteluperusteet ja Osaa 3: Siltojen liikennekuormat. Mitoitustapausten geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7. Muiden eurocodien mukaisten mitoitustapausten kuormitusohjeina käytetään Eurocode 1, Osaa 1 ja siihen liittyvää kansallista soveltamisasiakirjaa (NAD). Tapausten geotekninen mitoitus perustuu Eurocode 7 sekä sen kansalliseen soveltamisasiakirjaan.

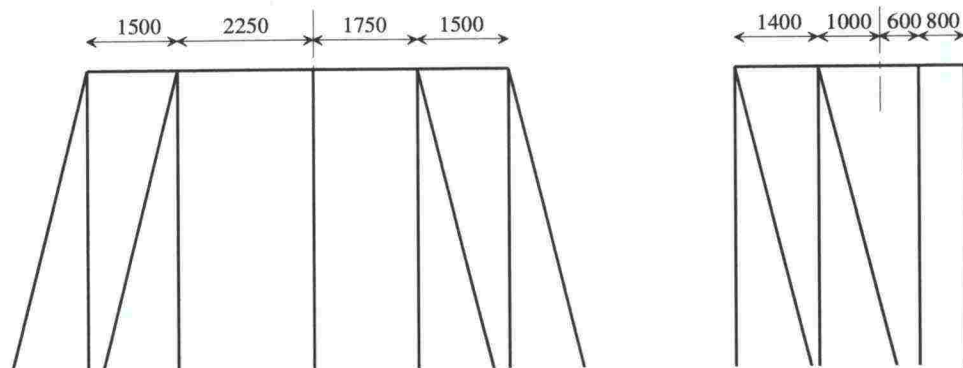
Tuen 1 ominaiskuormat tunnetaan. Ominaiskuormista lasketaan määrävien kuormayhdistelmien mukaiset mitoituskuormat ohjejärjestelmittäin.

### 2 Paaluperustuksen mitat

Kuvassa 1 on esitetty teräsbetonipaaluryhmän tasokuva ja kuvassa 2 paaluryhmän mitat.



Kuva 1. Paaluperustuksen tasokuva.



Kuva 2. Paaluryhmän mitat.

### 3 Paaluryhmään kohdistuvat kuormat

Tuen 1 teräsbetonipaaluryhmään kohdistuvat ominaiskuormat ja ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville mitoitusapauksille on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Taulukossa 1 on esitetty kuormien yhdistely, kun liikennekuormana on kuormakaavion 1 mukainen liikennekuorma.

Taulukko 1. Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville kuormitusapauksille, kun vaihtoehtoisena liikennekuormana on kuormakaavion 1 mukainen liikennekuorma.

Kuormat						Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B ja C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat												
Maatuen paino	-2210		1202		26	1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Pengerlaatan paino	-335		670		65	1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Täyte	-4600		8694		975	1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Päällysrakenne	-920					1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Maanpaine		892	-2640			1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat												
Liikennekuorma 1)	-1400		168		734	1	1,3	0,78	1,5	1,3	1,5	1,3
Erikoiskuorma 1)	-1140				1710	0	0	0	0	0	0	0
Lämpötilaero	-56					0,5	0,8	0	0,9	0,78	0,9	0,78
Lisäpäällyste	-80					0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Laakerikitka		55	-178			0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Maanpaine		261	-895			0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Sivusysäys				125	730	1	0,8	1,5	1,05	0,91	1,05	0,91
Tuulikuorma				36	220	0,5	0,8	1,5	0,9	0,78	0,75	0,65

1) keskenään vaihtoehtoisia kuormia.

Taulukossa 2 on esitetty kuormien yhdistely, kun liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

**Taulukko 2.** Yhteenveto kuormista sekä ohjejärjestelmien mukaiset yhdistelykertoimet määrääville kuormitustapauksille, kun vaihtoehtoisena liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

Kuormat						Yhdistelykertoimet						
	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B ja C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Pysyvät kuormat												
Maatuen paino	-2210		1202		26	1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Pengerlaatan paino	-335		670		65	1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Täyte	-4600		8694		975	1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Päällysrakenne	-920					1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Maanpaine		892	-2640			1	1	1,35	1,35	1	1,2	1
Muuttuvat kuormat												
Liikennekuorma 1)	-1400		168		734	0	0	0	0	0	0	0
Eriokoiskuorma 1)	-1140				1710	1	1,3	1,35	1,5	1,3	1,5	1,3
Lämpötilaero	-56					0,5	0,8	0	0,9	0,78	0,9	0,78
Lisäpäällyste	-80					0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Laakerikitka		55	-178			0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Maanpaine		261	-895			0,5	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Sivusysäys				125	730	1	0,8	0	1,05	0,91	1,05	0,91
Tuulikuorma				36	220	0,5	0,8	0	0,9	0,78	0,75	0,65

1) keskenään vaihtoehtoisia kuormia.

### 3.1 Paalujen mitoituskuormat

Paalujen mitoituskuormat on laskettu tielaitoksen Avaruuspaalutusohjelmalla. Ohjejärjestelmien antamat paaluryhmän mitoitusuureet sekä yksittäisten paalujen suurin  $P_{max}$  ja pienin paalukuorma  $P_{min}$  sekä paalukuormien keskiarvo  $P_{ka}$  on esitetty taulukoissa 3 ja 4 ohjejärjestelmittäin. Kaikkien ohjejärjestelmien mukaan suurin paalukuorma on paalulla 6 ja pienin paalulla 9. Paaluryhmän mitoitusuureet on laskettu käyttämällä taulukkojen 1 ja 2 antamia yhdistelykertoimia.

**Taulukko 3.** Ohjejärjestelmien antamat paaluryhmän mitoitusuureet sekä yksittäisten paalujen suurin ja pienin paalukuorma sekä paalukuormien keskiarvo, kun liikennekuormana on kuormakavion 1 mukainen liikennekuorma.

	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	Pmax (kN)	Pmin (kN)	Pka (kN)
TIEL-sall	-9533	1050	7736	143	2640	1059	349	696
TIEL-rajat	-9994	1145	7571	129	2780	1069	357	730
Euro 1-3 B ja C	-11980	1204	10831	242	3437	1465	433	874
Euro 1-1 B	-13122	1536	10199	164	3505	1365	474	958
Euro 1-1 C	-10001	1180	7492	142	2856	1078	313	730
Euro 1-1 NAD B	-11912	1402	9010	158	3312	1262	398	870
Euro 1-1 NAD C	-10001	1180	7492	137	2828	1069	322	730

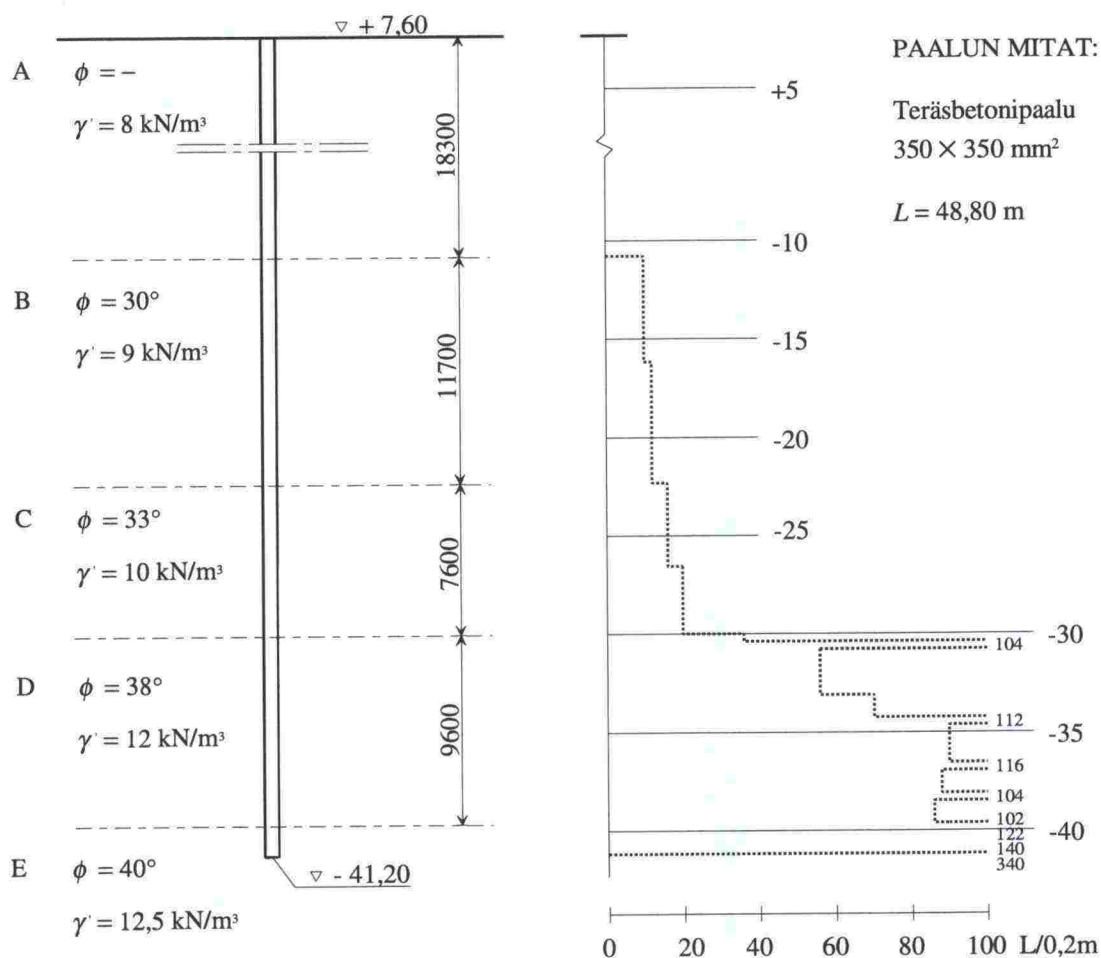


**Taulukko 4.** Ohjejärjestelmien antamat paaluryhmän mitoitussuureet sekä yksittäisten paalujen suurin ja pienin paalukuorma sekä paalukuormien keskiarvo, kun liikennekuormana on raskas erikoiskuorma.

	V (kN)	Hx (kN)	My (kNm)	Hy (kN)	Mx (kNm)	Pmax (kN)	Pmin (kN)	Pka (kN)
TIEL-sall	-9273	1050	7568	143	3616	1164	181	677
TIEL-rajat	-9656	1145	7352	129	4049	1206	139	705
Euro 1-3 B ja C	-12427	1204	10700	0	3748	1299	704	906
Euro 1-1 B	-12732	1536	9947	164	4969	1522	222	930
Euro 1-1 C	-9663	1180	7274	142	4125	1215	95	706
Euro 1-1 NAD B	-11522	1402	8758	158	4776	1420	147	842
Euro 1-1 NAD C	-9663	1180	7274	137	4096	1204	104	705

#### 4 Maaperätiedot ja paalun mitat

Kuvassa 3 on esitetty teräsbetonipaalun mitat, maaperätiedot ja heijarikairausdiagrammi.



**Kuva 3.** Maaperätiedot ja paalun mitat.

## 5 Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus

Teräsbetonipaalun murtokuorma lasketaan staattiseen kantavuuskaavaan, kairausvastukseen ja dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuvilla menetelmillä. Paalun murtokuormasta voidaan laskea paalun geotekninen kantavuus. Lisäksi lasketaan paalun kantavuus julkaisun Lyöntipaalutusohjeet mukaan.

### 5.1 Staattiseen kantavuuskaavaan perustuva menetelmä

Kaivinpaalun kärki- ja vaippakantavuus lasketaan Suurpaalutusohjeen mukaan. Kärki- ja vaippakantavuuden summa on paalun murtokuorma.

Staattinen kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Kärkivastus:

$$q_p = \sigma_{vp}' N_q$$

$$10d = 10 \cdot 0,35 = 3,5 \text{ m}$$

$$\sigma_{vp}' = 1,6 \cdot 12,5 + 1,9 \cdot 12 = 42,8 \text{ kN/m}^2$$

Keskimääräinen kitkakulma paalun kärjessä:

$$5d = 1,75 \text{ m}$$

$$3d = 1,05 \text{ m}$$

$$\phi = \frac{1,6 \cdot 40 + 0,15 \cdot 38 + 1,05 \cdot 40}{1,75 + 1,05} = 39,9^\circ$$

$$\Rightarrow N_q = 180$$

$$q_p = 42,8 \cdot 180 = 7704,0 \text{ kN/m}^2$$

Kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = 0,35^2 \cdot 7704,0 = 943,74 \text{ kN}$$

Vaippavastus:

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \phi_a$$

Taulukossa 5 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen maakerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan. Taulukon 5 mukainen kerroin  $K_s \tan \phi_a$  saadaan ohjeen mitoituskäyristä. Suurpaalutusohjeen mukaan maakerroksen keskimääräisen jännityksen laskennassa otetaan huomioon maan paino korkeintaan  $10d$  tarkastelukohdasta ylöspäin.

Taulukko 5. Vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain.

Maakerros	$\phi$	$\sigma_{v'}$ (kN/m2)	$K_s \tan \phi_a$	$f_s$ (kN/m2)	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	28,0	-	-	-
Kerros B	30	31,5	0,26	8,19	134,15
Kerros C	33	35,0	0,35	12,25	130,34
Kerros D	38	42,0	0,74	31,08	417,72
Kerros E	40	42,4	1,00	42,40	94,98

Kokonaisvaippakantavuus:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 134,15 + 130,34 + 417,72 + 94,98 = 777,19 \text{ kN}$$

Paalun murtokuorma staattisen kantavuuskaavan perusteella:

$$P_u = 943,74 + 777,19 = 1721 \text{ kN}$$

5.2 Kairausvastukseen perustuva menetelmä

Kantavuuskaava:

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s ds + A_{pk} q_p$$

Keskimääräinen heijarikairausvastus paalun kärjessä (l/0,2m):

$$5d = 1,75 \text{ m}$$

$$3d = 1,05 \text{ m}$$

$$\frac{1,6 \cdot 121 + 0,15 \cdot 86 + 1,05 \cdot 340}{1,75 + 1,05} = 201 \text{ l/0,2m}$$

Kärkivastus:

$$\Rightarrow q_p = 20 \text{ MPa} = 20\,000 \text{ kN/m}^2$$

Kärkikantavuus:

$$A_{pk} q_p = 0,35^2 \cdot 20000 = 2450,0 \text{ kN}$$



Taulukossa 6 on esitetty vaippakantavuuden laskeminen kerroksittain Suurpaalutusohjeen mukaan.

Taulukko 6. Vaippakantavuuden laskeminen.

Maakerros	Keskimäär. lyöntivastus	$f_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	Vaippakantavuus (kN)
Kerros A	-	-	-
Kerros B	11	37	606,06
Kerros C	18	60	638,40
Kerros D	78	120	1612,80
Kerros E	121	150	336,00

Kokonaisvaippakantavuus:

$$\int_0^z \pi d f_s ds = 606,06 + 638,40 + 1612,80 + 336,00 = 3193,26 \text{ kN}$$

Teräsbetonipaalun murtokuorma kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan:

$$P_u = 2450,0 + 6193,26 = 5643 \text{ kN}$$

### 5.3 Dynaamisiin paalutuskaavoihin perustuva menetelmä

Teräsbetonipaalujen pysyvä painuma oli noin 15 mm viimeisellä 10 iskun sarjalla paalutus-pöytäkirjojen mukaan, jolloin yhtä iskua kohden painuma oli 1,5 mm. Pudotusjärkäleen paino oli 60 kN ja iskutyynyn paino 0,2 kN paalutuspöytäkirjojen mukaan. Järkäleen pudotuskorkeus oli 0,40 m. Betonin kimmokerroin on  $30 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$  ja paalun poikkileikkausala  $0,1225 \text{ m}^2$ . Paalun murtokuorma lasketaan seuraavilla dynaamisilla paalutuskaavoilla.

Krüger:

$$P_u = 0,8 \frac{kH}{s + c/2} w \left(1 - 0,1 \frac{w_p}{w}\right)$$

Weisbach:

$$P_u = -\frac{sAE_p}{L} + \sqrt{\frac{2wHAE_p}{L} + \left(\frac{sAE_p}{L}\right)^2}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + (C_1 + C_2 + C_3)/2} \cdot \frac{w + n^2 w_p}{w + w_p}$$

Janbu (vanha):

$$P_u = \frac{wH}{k_u s}$$

$$k_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda_e / C_d})$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 w_p / w$$

$$\lambda_e = \frac{wHL}{AE_p s^2}$$

Danish:

$$P_u = \frac{e_f wH}{s + \sqrt{e_f wHL / 2AE_p}}$$

Gates:

$$P_u = 96 \sqrt{e_f wH} (2,4 - \log s)$$

missä

- $s$  on paalun painuma,
- $c$  on paalun jousto,
- $A$  on paalun poikkileikkausala,
- $E_p$  on paalun kimmokerroin,
- $L$  on paalun pituus,
- $C_1$  on iskutyynyn ja paalun yläpään kimmainen muodonmuutos (0-5 mm),
- $C_2$  on paalun kimmainen muodonmuutos,
- $C_3$  on maan kimmainen muodonmuutos,
- $w_p$  on paalun paino ja
- $w$  on järkäleen paino.
- $H$  on lyöntikorkeus,
- $e_f$  on järkäleen tehokkuuskerroin (= 0,75),
- $k$  on korjauskerroin (= 0,8) ja
- $n$  on joustokerroin (= 0,3).

Teräsbetonipaalun joustoa ei ole mitattu, mutta julkaisun Lyöntipaalutusohjeet mukaan jouston suuruus voidaan arvioida seuraavalla kaavalla:

$$c = \frac{P_u w}{w_{pp} AE_p}$$

missä

- $w_{pp}$  on paalun paino juoksumetriä kohden.

Tämä jouston kaava sijoitetaan Krüger-paalutuskaavaan ja iteroimalla saadaan paalun murtokuorma, jonka avulla voidaan paalun jousto laskea. Laskettua joustoa käytetään Hiley'n paalutuskaavassa paalun, maan sekä iskutyynyn ja paalun yläpään kimmoisien muodonmuutoksien summan arvona.

Lasketaan paalun ja iskutyynyn paino. Teräsbetonipaalun pituus on 48,8 m ja iskutyynyn paino 0,2 kN.

$$w_p = 48,8 \cdot 0,35^2 \cdot 25 + 0,2 = 150 \text{ kN}$$

Jouston laskentaa varten tarvitaan myös paalun paino juoksumetriä kohden.

$$w_p = 0,35^2 \cdot 25 = 3,06 \text{ kN/m}$$

Lasketaan paalun murtokuorma Krüger-paalutuskaavalla:

$$P_u = 0,8 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,4}{0,0015 + \frac{P_u \cdot 60}{2 \cdot 3,06 \cdot 0,1225 \cdot 30 \cdot 10^6}} \cdot 60 \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{150}{60}\right)$$

Iteroimalla saadaan murtokuormaksi  $P_u = 1816 \text{ kN}$  ja jouston arvoksi 9,7 mm.

Lasketaan paalun murtokuorma edellä mainituilla kaavoilla:

Weisbach:

$$P_u = -\frac{0,0015 \cdot 0,1225 \cdot 30 \cdot 10^6}{48,8} + \sqrt{\frac{2 \cdot 60 \cdot 0,4 \cdot 0,1225 \cdot 30 \cdot 10^6}{48,8} + \left(\frac{0,0015 \cdot 0,1225 \cdot 30 \cdot 10^6}{48,8}\right)^2}$$

$$= 1792 \text{ kN}$$

Hiley:

$$P_u = \frac{0,75 \cdot 60 \cdot 0,4}{0,0015 + 0,0097 / 2} \cdot \frac{60 + 0,3^2 \cdot 150}{60 + 150} = 992 \text{ kN}$$

Janbu (vanha):

$$\lambda_e = \frac{60 \cdot 0,4 \cdot 48,8}{0,1225 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 0,0015^2} = 141,64$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \cdot 150 / 60 = 1,125$$

$$k_u = 1,125(1 + \sqrt{1 + 141,64 / 1,125}) = 13,798$$

$$P_u = \frac{60 \cdot 0,4}{13,798 \cdot 0,0015} = 1160 \text{ kN}$$



Danish:

$$P_u = \frac{0,75 \cdot 60 \cdot 0,4}{0,0015 + \sqrt{0,75 \cdot 60 \cdot 0,4 \cdot 48,8 / 2 \cdot 0,1225 \cdot 30 \cdot 10^6}} = 1448 \text{ kN}$$

Gates:

$$P_u = 96 \sqrt{0,75 \cdot 60 \cdot 0,4} \cdot (2,4 - \log 0,0015) = 2128 \text{ kN}$$

Teräsbetonipaalun murtokuormat, jotka on laskettu dynaamisilla paalutuskävoilla on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Teräsbetonipaalun murtokuormat dynaamisten paalutuskävojen perusteella.

	Krüger	Weisbach	Hiley	Janbu (vanha)	Danish	Gates
Murtokuorma (kN)	1816	1792	992	1160	1448	2128

## 5.4 Lyöntipaalutusohjeen mukaan

Aurajokilaakson sillan teräsbetonipaalujen paalutusluokka on IB. Lyöntipaalutusohjeen mukaan teräsbetonipaalujen sallittu geotekninen kantavuus paalutusluokassa IB on  $\leq 9$  MPa. Oletetaan, että teräsbetonipaalujen kantavuus on 9 MPa. Paalujen sallituksi kuormaksi saadaan 1100 kN. Oletetaan, että käytetty kokonaisvarmuusluku on 2,8, jolloin paalujen murtokuorman arvoksi saadaan 3080 kN Lyöntipaalutusohjeen mukaan.

## 6 Laskentaesimerkin tulokset

Seuraavissa taulukoissa on esitetty eri ohjejärjestelmien mukaan lasketut paalun geotekniset kantavuudet, mitoituskuormat sekä mitoitusvarmuusluvut eri laskentamenetelmillä. Mitoitusvarmuusluku on paalun geoteknisen kantavuuden ja mitoituskuorman suhde. Taulukkojen mitoituskuormat saadaan taulukoista 3 ja 4. Taulukossa 8 on esitetty staattisen kantavuuskaavan antamat tulokset eri ohjejärjestelmille.

Taulukko 8. Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku staattisen kantavuuskaavan mukaan, kun paalun murtokuorma on laskettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-raijat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Staattinen kantavuuskaava								
- murtokuorma	1721	1721	1721	1721	1721	1721	1721	1721
- kantavuuden omin.arvo	-	1076	1147	1147	1147	1147	1076	1076
- geotekninen kantavuus	574-688	827	883	883	883	883	827	827
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,49-0,59	0,69	0,60	0,60	0,58	0,73	0,58	0,69

Taulukon 8 mukaan eurocode-ohjejärjestelmän mukaisista mitoituksista neljän viimeisen mitoitusastapauksen määräävän mitoituksen antaa tapaus B. Eurocodien mukaiset määräävät mitoitukset antavat mitoitusvarmuusluvulle arvoja, jotka ovat tielaitoksen mitoitusastapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuuslukujen antamien raja-arvojen keskivaiheilla. Taulukossa 9 on esitetty kairausvastukseen perustuvan menetelmän antamat laskentatulokset teräsbetoni-paalulle.

*Taulukko 9.* Teräsbetoni-paalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuus-luku kairausvastukseen perustuvan menetelmän mukaan, kun paalun murtokuorma on las-kettu Suurpaalutusohjeen mukaan.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Kairausvast. per. men.								
- murtokuorma	5643	5643	5643	5643	5643	5643	5643	5643
- kantavuuden omin.arvo	-	3527	3762	3762	3762	3762	3527	3527
- geotekninen kantavuus	1881-2257	2713	2894	2894	2894	2894	2713	2713
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	1,62-1,94	2,25	1,98	1,98	1,90	2,38	1,91	2,25

Taulukoissa 10, 11, 12, 13, 14 ja 15 on esitetty dynaamisten paalutuskäyttöjen antamat mitoitusvarmuusluvut teräsbetoni-paalulle ohjejärjestelmittäin. Taulukkojen ensimmäisen mitoitusastapauksen, joka on tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmän mukainen mitoi-tus, kokonaisvarmuusluku on huomioitu kantavuuden arvossa. Sallittujen jännitysten mene-telmällä paalun geotekninen kantavuus saadaan kahden geoteknisen kantavuusarvon välinä, koska menetelmän mukainen kokonaisvarmuuskerroin on 2,5-3,0.

Taulukossa 10 on esitetty mitoitusvarmuusluvun laskenta, kun paalun murtokuorma on laskettu Krüger'in dynaamisella paalutuskäytöllä

*Taulukko 10.* Teräsbetoni-paalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuus-luku Krüger'in dynaamisen paalutuskäytön perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Krüger								
- murtokuorma	1816	1816	1816	1816	1816	1816	1816	1816
- kantavuuden omin.arvo	-	1135	1211	1211	1211	1211	1135	1135
- geotekninen kantavuus	605-726	873	931	931	931	931	873	873
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,52-0,62	0,72	0,64	0,64	0,61	0,77	0,61	0,73

Taulukoissa 11, 12 ja 13 on esitetty teräsbetonipaalun mitoitus Weisbach'n, Hiley'n ja Janbu'n dynaamisten paalutuskäävojen perusteella.

**Taulukko 11.** Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Weisbach'in dynaamisen paalutuskäävän perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Weisbach								
- murtokuorma	1792	1792	1792	1792	1792	1792	1792	1792
- kantavuuden omin.arvo	-	1120	1195	1195	1195	1195	1120	1120
- geotekninen kantavuus	597-717	862	919	919	919	919	862	862
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,51-0,62	0,71	0,63	0,63	0,60	0,76	0,61	0,72

**Taulukko 12.** Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Hiley'n dynaamisen paalutuskäävän perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Hiley								
- murtokuorma	992	992	992	992	992	992	992	992
- kantavuuden omin.arvo	-	620	661	661	661	661	620	620
- geotekninen kantavuus	331-397	477	509	509	509	509	477	477
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,28-0,34	0,40	0,35	0,35	0,33	0,42	0,34	0,40

**Taulukko 13.** Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Janbu'n dynaamisen paalutuskäävän perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Janbu (vanha)								
- murtokuorma	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
- kantavuuden omin.arvo	-	725	773	773	773	773	725	725
- geotekninen kantavuus	387-464	558	595	595	595	595	558	558
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,33-0,40	0,46	0,41	0,41	0,39	0,49	0,39	0,46



Taulukoissa 14 ja 15 on esitetty teräsbetonipaalun mitoitus Danish ja Gates'in dynaamisten paalutuskasvojen perusteella.

*Taulukko 14.* Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Danish dynaamisen paalutuskasvan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-raijat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Danish								
- murtokuorma	1448	1448	1448	1448	1448	1448	1448	1448
- kantavuuden omin.arvo	-	905	965	965	965	965	905	905
- geotekninen kantavuus	483-579	696	743	743	743	743	696	696
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,41-0,50	0,58	0,51	0,51	0,49	0,61	0,49	0,58

*Taulukko 15.* Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku Gates'in dynaamiseen paalutuskasvan perusteella.

	TIEL-sall	TIEL-raijat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
Gates								
- murtokuorma	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128
- kantavuuden omin.arvo	-	1330	1419	1419	1419	1419	1330	1330
- geotekninen kantavuus	709-851	1023	1091	1091	1091	1091	1023	1023
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,61-0,73	0,85	0,74	0,74	0,72	0,90	0,72	0,85

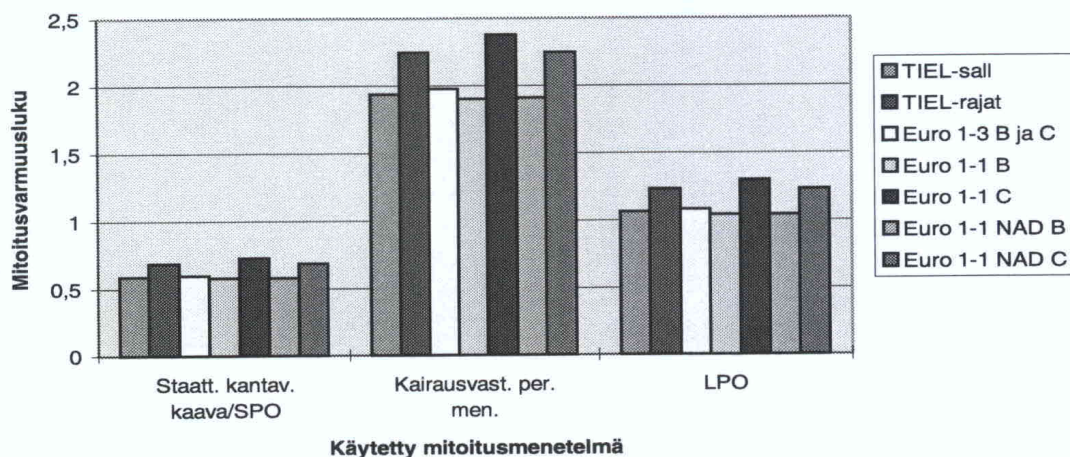
Taulukoiden 10, 11, 12, 13, 14 ja 15 mukaan dynaamisten paalutuskasvojen perusteella lasketut mitoitusvarmuuslukujen arvot riippuvat paalutuskasvasta. Hiley'n kaava antaa mitoitusvarmuusluvulle alhaisimmat arvot. Jokaisella paalutuskasvalla tielaitoksen mitoitus-tapauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluvun antamien raja-arvojen väliin mahtuvat eurocode-ohjejärjestelmän mukaan lasketut määräävien tapausten antamat mitoitusvarmuusluvut. Mitoitustapaus TIEL-raijat antaa korkeampia arvoja kantavuuden ja mitoituskuorman suhteelle kuin tielaitoksen sallittujen jännitysten menetelmä ja eurocodien mukaiset mitoittavat tapaukset.

Taulukossa 16 on esitetty teräsbetonipaalun mitoitusvarmuusluvun laskenta, kun paalun murtokuorman arvona käytetään Lyöntipaalutusohjeen antamasta sallitun geoteknisen kantavuuden arvosta laskettua murtokuormaa.

**Taulukko 16.** Teräsbetonipaalun geotekninen kantavuus (kN), mitoituskuorma (kN) ja mitoitusvarmuusluku, kun käytetään paalujen murtokuormana LPO:n antamasta sallitun geoteknisen kantavuuden arvosta laskettua murtokuormaa.

	TIEL-sall	TIEL-rajat	Euro 1-3 B	Euro 1-3 C	Euro 1-1 B	Euro 1-1 C	Euro 1-1 NAD B	Euro 1-1 NAD C
LPO								
- murtokuorma	3080	3080	3080	3080	3080	3080	3080	3080
- kantavuuden omin.arvo	-	1925	2053	2053	2053	2053	1925	1925
- geotekninen kantavuus	1027-1232	1481	1579	1579	1579	1579	1481	1481
Mitoituskuorma	1164	1206	1465	1465	1522	1215	1420	1204
Mitoitusvarmuusluku	0,88-1,06	1,23	1,08	1,08	1,04	1,30	1,04	1,23

Kuvassa 4 on esitetty staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvien menetelmien antamat mitoitusvarmuusluvut ohjejärjestelmittäin. Paalun murtokuorma laskettiin molemmilla menetelmillä julkaisun Suurpaalutusohje mukaan. Kuvassa on esitetty myös mitoitusvarmuusluvut, jotka on laskettu Lyöntipaalutusohjeen antamasta murtokuorman arvosta. Kuvassa esiintyvä mitoituspaauksen TIEL-sall mitoitusvarmuusluku vastaa kokonaisvarmuuslukua 2,5.

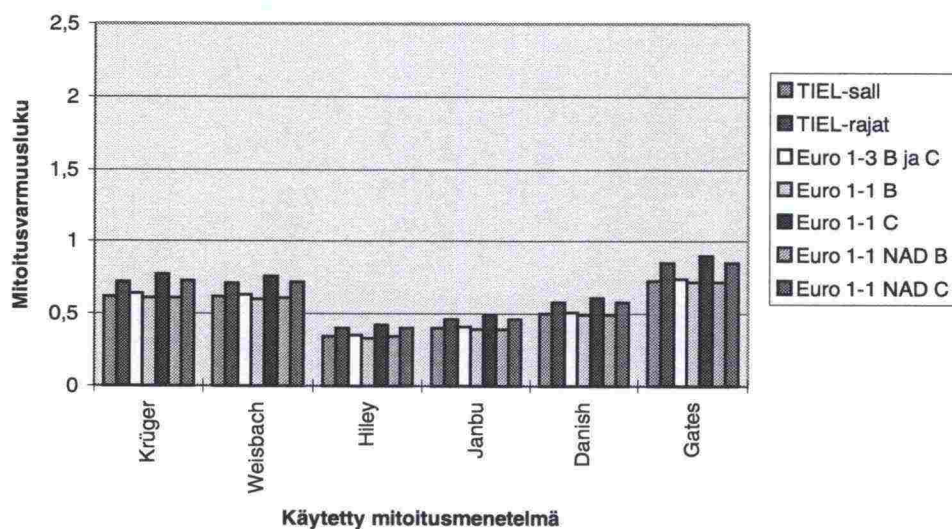


**Kuva 4.** Laskentaesimerkin tulokset, kun paalun murtokuorma on laskettu staattiseen kantavuuskaavaan ja kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä sekä Lyöntipaalutusohjeen mukaan.

Kuvassa 5 on esitetty teräsbetonipaalun mitoitusvarmuusluvut, jotka on laskettu dynaamisten paalutuskasvojen perusteella. Kun verrataan kuvan 5 antamia mitoitusvarmuuslukuja kuvassa 4 esiintyviin mitoitusvarmuuslukuihin ja vastaava mitoitusmenetelmien välinen vertailu tehdään laskentaesimerkkien 3-6 antamien tulosten välillä, huomataan että tämän esimerkin dynaamisten paalutuskasvojen antamat mitoitusvarmuusluvut antavat alhaisia arvoja verrattuna laskentaesimerkkien 3-6 antamiin arvoihin. Ero johtunee siitä, että laskentaesimerkkien 3-6 paalutuskasvojen murtokuormien laskennassa käytettiin koekuormituksissa mitattua todellista paaluun siirtynyttä energiaa. Tässä esimerkissä murtokuormat on



laskettu paalutuspöytäkirjojen tietojen perusteella. Kun paalujen murtokuorma lasketaan dynaamisten paalutuskäyrien perusteella, joissa on käytetty paalutuspöytäkirjojen antamia tietoja, paalutuskäyrien antavat varmalla puolella olevia tuloksia.



Kuva 5. Laskentaesimerkin tulokset, kun paalun murtokuorma on laskettu dynaamisilla paalutuskäyriä.



## **TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA**

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011
- 2/1994 Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. TIEL 3100013

## **TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ**

- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 81/1993 Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi, tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 4/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmalla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213
- 8/1994 Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219
- 12/1994 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992-1993. Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus korkeassa lämpötilassa ja päällysteen reunan vaikutus. TIEL 3200223
- 28/1994 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Vuoden 1993 kuormituskokeet. TIEL 3200238
- 30/1994 Kallioleikkaukset. TIEL 3200240
- 45/1994 Maan routimisen termomekaaninen malli ja sen laskelmat. TIEL 3200254
- 47/1994 Masuunihiekan käyttö päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200256
- 53/1994 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, loppuraportti. TIEL 3200262
- 3/1995 Kuormituskestävyyden tavoitekriteerit. TIEL 3200281
- 15/1995 Betonipäällysteen seuranta, vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 2. TIEL 3200293
- 20/1995 Sään ja hydrologisten tekijöiden vaikutus kevätkelirikkoon. TIEL 3200298
- 30/1995 TPPT:n laatusuunnitelma. TIEL 3200308
- 43/1995 Tukitelineperustusten kantokyky. TIEL 3200319
- 44/1995 Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. TIEL 3200320
- 45/1995 Maanvaraisten perustusten kantokyvyn laskenta elementtimenetelmällä. TIEL 3200321
- 54/1995 Veittostensuon koerakenteen toiminta ja laadun arviointi. TIEL 3200330

## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 58/1995 Kestävän kehityksen tierakenteet - ideakilpailu. TIEL 3200333
- 94/1995 Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kalrauksen välinen riippuvuus. TIEL 3200369
- 6/1996 Tuotannon laatu; Kuormitus ja routakestävyysrakenteet. TIEL 3200375
- 13/1996 Masuunihiekkastabilointi. TIEL 3200382
- 16/1996 Tavoitekriteerit (TPPT). TIEL 3200385
- 17/1996 Moreenin hyötykäytön edistäminen murskausteknisin keinoin (TPPT). TIEL 3200386
- 29/1996 Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
- 33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
- 34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, osa 1. TIEL 3200402
- 35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
- 36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
- 37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet. TIEL 3200405
- 38/1996 Rakenneratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 39/1996 Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi korkearakeisilla kiviaineksilla, osa 2. TIEL 3200412
- 46/1996 LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina. TIEL 3200414
- 70/1996 Kantavan kerroksen asfalttibetoni; Referenssimateriaalin ominaisuudet. TIEL 3200437
- 77/1996 Syvästabilointi kehittyvänä pohjavahvistusmenetelmänä; International Conference IS-Tokio '96. TIEL 3200444
- 78/1996 Moreenin rakeistaminen pellettimalla; Nykytilaselvitys. TIEL 3200445
- 4/1997 Siltojen perustusten geoteknisen mitoituksen vertailu eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200452
- 5/1997 Tiepenkereen luonnonluiskan ja jäykän tukimuurirakenteen vertailevat mitoituslaskelmat eurocodien ja kansallisten ohjeiden mukaan. TIEL 3200453
- (Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150
- 39/1994 Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. TIEL 3200248
- 42/1994 Nauhapystyjoitus. TIEL 3200251
- 67/1994 Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. TIEL 3200276
- 79/1995 Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354
- 79/1996 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200446

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-726-315-5  
TIEL 3200452